

MICROFABRIQUE: MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION DE SYSTÈMES DE PRODUCTION MINIATURISÉS ET MODULAIRES, DISPOSANT D'UN ENVIRONNEMENT SALLES BLANCHES

THÈSE N° 3549 (2006)

PRÉSENTÉE LE 22 JUIN 2006

À LA FACULTÉ SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR
Laboratoire de systèmes robotiques
SECTION DE MICROTECHNIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Irène VERETTAS

ingénieure en microtechnique diplômée EPF
et de nationalité hellénique

acceptée sur proposition du jury:

Prof. M.-O. Hongler, président du jury
Prof. R. Clavel, directeur de thèse
Dr A. Codourey, rapporteur
Prof. J. Jacot, rapporteur
Prof. P. Lutz, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Lausanne, EPFL
2006

A Kostas,
A mes parents

Résumé	3
Abstract	5
Remerciements	7
Chapitre 1. Introduction	9
1.1. Nomenclature.....	11
1.2. Points originaux	12
Chapitre 2. Etat de l'art	13
2.1. Salles blanches.....	13
2.1.1. Historique	13
2.1.2. Normes pour la mesure de la propreté	14
2.1.3. La structure d'une salle blanche	15
2.2. Microfactory ou microfabrique	17
2.2.1. La première Microfactory au Japon.....	17
2.2.2. Minifactory de Carnegie Mellon University	18
2.2.3. Microfactory d'OLYMPUS.....	19
2.2.4. Microfactory électrochimique	20
2.2.5. Le AMMS du Fraunhofer Institut.....	20
2.3. Minienvironnements	21
2.3.1. MA ³ MST assembleur	22
2.3.2. Consortium DTF.....	23
2.3.3. TOMI projet en Finlande	24
2.4. Les filtres	24
2.4.1. Le fonctionnement des filtres	24
2.4.2. Classification des filtres.....	26
2.5. Conclusion	26
Chapitre 3. Méthodologie de dimensionnement du microbox	27
3.1. Exemple de réalisation d'un produit fictif	27
3.2. Introduction de la méthodologie	29
3.3. Organigramme de la méthodologie	29
3.4. Etapes de la méthodologie de conception.....	32
3.5. Base de données de l'équipement de la microfactory	33
3.6. Gamme d'assemblage du produit	34
3.7. Recherche de solutions	38
3.8. Estimation du temps de production	39
3.8.1. Configuration de microboxes en série sans convoyeur	42
3.8.2. Configuration utilisant un convoyeur	48
3.8.3. Influence des différents paramètres du microbox sur la cadence	50
3.9. Méthodologie pour la détermination du coût optimal du produit.....	53
3.10. Comparaison des scénarios et vérification de leur compatibilité	54
3.11. Configuration finale de la microfactory	55
3.12. Conclusions de la méthodologie de conception de la microfactory	55
Chapitre 4. Conception d'environnements propres miniaturisés	57
4.1. Caractéristiques des filtres.....	57
4.2. Flux laminaire.....	60
4.3. Modélisations et calculs.....	61
4.3.1. Introduction	61
4.3.2. Le nombre de Reynolds.....	61
4.3.3. Simulations du flux.....	66
4.4. Mesures et expériences	67

4.4.1.	Introduction	67
4.4.2.	Visualisation du flux laminaire.....	67
4.5.	Cartographie de la vitesse de l'air	71
4.5.1.	Conclusions sur la configuration idéale de l'homogénéisateur	79
4.6.	Mesures de propreté du microbox	79
4.7.	Conclusions	83
Chapitre 5.	Concepts pour la microfactory	85
5.1.	Concepts	85
5.1.1.	Microfactory à recyclage de l'air.....	85
5.1.2.	Microfactory à air comprimé.....	86
5.1.3.	Microfactory sur table rotative	87
5.1.4.	Disposition des microboxes.....	88
5.1.5.	Conclusion sur les concepts.....	90
5.2.	Application pratique : la Pocket Factory	90
5.2.1.	La partie fluidique	92
5.2.2.	Le robot.....	92
5.2.3.	Le robot « Pocket SCARA » de l'EPFL.....	92
5.2.4.	Le robot « PocketDelta »	95
5.2.5.	Le système d'entrée et de sortie des composants	95
5.2.6.	La commande du robot	97
5.3.	Conclusions	99
Chapitre 6.	Conclusions	101
6.1.	Contributions	102
6.2.	Améliorations et mesures prévues	103
6.3.	Perspectives	104
Annexes	105
A 1.	Application industrielle	105
A 2.	Simulations du flux.....	109
A 3.	Cartographie de l'homogénéisateur.....	112
A 4.	Mesures de la propreté.....	123
A 5.	Quelques concepts de la microfactory	133
Bibliographie	135
Curriculum Vitae	139

Mots-clés : Microfactory, mini environnement, salles blanches, méthodologie

Résumé

La conception de chaînes d'assemblage miniatures est un domaine en développement depuis les années '90 au Japon et les dernières années aussi en Europe.

Le but principal de cette thèse est de trouver une méthodologie pour le développement rapide d'une chaîne de production miniature et modulaire. Cette méthodologie aide le concepteur à choisir la configuration et la taille de la microfactory la plus appropriée à son produit. Une base de données est remplie par le concepteur et comporte toutes les machines, robots et palettes potentiellement utilisables pour la réalisation d'un assemblage demandé. Après vérification de différents critères de compatibilité, notre méthodologie permet de comparer les solutions possibles par rapport au temps ou au coût de production.

Cette thèse cherche aussi à démontrer la faisabilité d'une telle chaîne d'assemblage miniature, à environnement propre. Ainsi, l'assemblage des microcomposants sous environnement propre peut être réalisé sans avoir recours à une salle blanche standard. Ceci permet de diminuer le temps de construction, la mise en marche et le coût du système. Une telle chaîne d'assemblage est nommée Microfactory.

En utilisant uniquement un réseau d'air comprimé et un système de filtres, on crée l'environnement propre à l'intérieur de la Microfactory.

Le concept proposé est modulaire. Dans chaque module sont réalisées les opérations nécessaires pour l'assemblage d'un composant différent.

Chaque module dispose :

- D'un système d'homogénéisation de l'air comprimé. Ce système permet de transformer, après la filtration, l'air comprimé en flux laminaire.
- D'un robot manipulateur qui transfère les composants qui arrivent sur une palette à la machine d'assemblage. Après l'assemblage il transfère le sous-ensemble terminé à un endroit accessible par le robot du microbox suivant, et ainsi de suite.
- D'un système (sas) qui permet d'entrer et de sortir les palettes sans contaminer l'environnement propre dans le module, ni les composants.
- D'une machine spécifique à l'opération nécessaire (sertissage, collage, soudage, lavage, etc.)

Une série de mesures a démontré l'efficacité de la filtration de l'air en n'utilisant uniquement des filtres pour l'air comprimé.

Un prototype a été réalisé pour démontrer la faisabilité, mais aussi pour affronter directement la problématique de la conception. Le volume de travail adopté pour le premier prototype est d'un décimètre cube. Sa surface utile est égale à quatre fois la surface d'une palette de 2" (~ 50 x 50 mm). Son temps de mise en marche (obtenir un environnement propre de classe 10) est inférieur à deux minutes.

Les mesures de la vitesse de l'air dans le volume de travail et une visualisation du flux, ont prouvé qu'il est possible de transformer l'air comprimé en un flux laminaire en utilisant un dispositif appelé homogénéisateur.

Key words: microfactory, minienvironment, clean room, methodology

Abstract

Since 1990 in Japan and the last years in Europe, the concept of small assembly lines called Microfactories is under investigation.

The main goal of this thesis is to establish a methodology for a quick setup of a miniature and modular assembly line. This methodology assists the designer to choose the most appropriate configuration and size of microfactory. In order to achieve the design of the microfactory, it is necessary to create a “configuration database”. The “configuration database” contains all the robots, machines and palettes useful for the product assembly. Following a control for the compatibility between product and process properties, the program compares the possible solutions, and proposes the higher throughput or the most economic one.

This thesis proves the feasibility of such miniature assembly lines, operating in a clean mini environment, where the assembly process can be done out of a standard clean room. This feature reduces the development and the setup time and the cost of the system.

In order to establish the clean room environment, compressed air or other inert gas with the appropriate filters, are used.

The microfactory concept is modular, where each module is dedicated to specific assembly process.

Each module includes:

- A system to transform compressed air to laminar flow.
- A robot to manipulate and to transfer components from the palette to the assembly post. After assembly, the robot transfers the sub-assembly to an adjacent position, which is accessible by the robot of the next assembly module.
- An entry port which is a system to input and output 50 mm x 50 mm palettes from non-clean environment into the clean one of a module. A clean air jet is purging both palette joins before opening. The palette is opened inside the microbox, without any contamination.
- The systems for the specific assembly processes (adhesive dispenser, pressing, vision assistance, cleaning, etc.)

Measurements are demonstrating the efficiency and the feasibility of this system, using only compressed air and appropriate filters.

A prototype is developed to demonstrate the feasibility and to confront directly the real problems of the concept. The working volume of this first prototype is a cubic decimeter. Its useful surface is equal to four times the surface of a palette of 2” (~ 50 x 50 mm). The time to establish the clean room environment (class 10) is less than two minutes.

It is demonstrated by measurement of the air velocity and visualization of the air stream, that compressed air may generate laminar flow using a special device called “homogeneisateur”.

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, m'ont aidée et soutenue tout au long de ces années.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord au Professeur Reymond Clavel, qui a accepté d'être mon directeur de thèse et m'a aidé par ses précieux conseils. Les discussions avec lui étaient toujours très fructueuses et pleines d'encouragement pour la suite. Je lui suis aussi extrêmement reconnaissante de m'avoir donné la possibilité d'accomplir ce travail de doctorat dans d'excellentes conditions.

Je remercie aussi tout particulièrement le Docteur Alain Codourey du CSEM à Alpnach qui fut également le superviseur de cette thèse. Avec ses idées visionnaires sur la microfactory, il a toujours su donner une impulsion dynamique dans le développement du concept de la microfactory.

Le CSEM mérite toute ma gratitude pour avoir co-financé cette thèse. Je remercie spécialement Sébastien Perroud pour l'aide technique apportée lors de la programmation de la commande du robot du microbox.

Je souhaiterais aussi remercier les autres membres du jury qui ont accepté de consacrer leur précieux temps à l'évaluation de ce travail: merci au Professeur Jacques Jacot du LPM à l'EPFL et au Professeur Philippe Lutz du LAB à Besançon pour les nombreuses discussions à propos du concept de la microfactory.

Le contact avec les entreprises impliquées dans la réalisation de microsystèmes, permet une confrontation directe avec des problèmes réels et la mise en oeuvre de leur solution. Dans ce contexte, je remercie tout particulièrement Messieurs Sébastien Menot, Antoine Blondel, Niklaus Schneeberger, Philippe Clot et Lionel Lemaire de m'avoir accordé leur précieux temps pour m'exposer la problématique de l'assemblage de leurs produits. Leurs remarques et propositions m'ont été très utiles. Je tiens aussi à remercier Messieurs Björn Form de LogicAir et Didier Jacquaroud de SMC pour leurs conseils très importants sur la conception des salles blanches et des filtres à air comprimé.

La réalisation du prototype de cette thèse n'aurait pas été possible sans la contribution de Monsieur Georges Perrenoud et de ses collègues de l'atelier de microtechnique, Messieurs Jean-Jacques Crausaz, Pascal Zbinden et Claude Amendola.

Je remercie aussi toute l'équipe du CMI et spécialement Jean-Marie Voirol et Georges Brélat pour leurs conseils, la mise à disposition des appareils de mesure, ainsi que pour m'avoir permis d'effectuer plusieurs mesures et expériences dans la salle blanche du CMI.

Un grand merci à mon collègue de bureau Stephane Rossopoulos pour sa disponibilité et les « brain stormings » à propos de la microfactory, au cours desquels de nombreuses idées ont surgi.

Les étudiants de semestre et de diplôme ont tous contribué à la réalisation du prototype et l'élaboration de nombreux concepts. Je remercie Mélanie Dafflon, Yves Girardin, Ahmed Berrada, Jerome Werlen, Alexis Reust, Mario Greber, Frédéric Valko et Cédric Zwalen.

Merci encore à tous les collègues du LSRO pour les discussions et les services rendus. Citons, sans être exhaustif: Heidi Banz, Anne Remillet et Evelyn Rovero, nos secrétaires, pour avoir toujours promptement résolu toutes les questions administratives, Willy Maeder, Tiavina Niaritsiry, Mélanie Dafflon, Benoit Lorent, Ulrich Spaelter,

Emanuele Lubrano, Nuno Fazenda, Mohamed Bouri, Arvid Bergander et Walter Driesen pour leurs conseils et encouragements tout au long de ce projet.

Un grand merci à Jean-Pierre Melchner pour la lecture, correction orthographique et conseils pour la rédaction de ce travail.

Un énorme merci à mon père pour les conseils techniques, ainsi qu'à ma mère pour la correction orthographique de ce rapport et leur soutien tout au long de ces années.

Finalement, j'aimerais exprimer ma reconnaissance à mon fiancé Kostas pour ses encouragements lors des moments difficiles et sa présence à mes côtés.

Chapitre 1. Introduction

L'évolution technologique des dernières décennies permet de fabriquer des produits de plus en plus miniaturisés. Grâce à cette évolution, il est possible d'avoir des appareils multifonctionnels et de petite dimension. Un exemple très connu par le public est le téléphone portable qui est en même temps un appareil photographique, un agenda, un réveil etc.

Pour réussir à intégrer tant de fonctions dans un si petit volume, il est nécessaire de miniaturiser tous les composants, à commencer par les composants électroniques. Effectivement, grâce aux technologies des semi-conducteurs il est désormais possible d'intégrer des circuits électroniques très complexes dans une puce de silicium mesurant à peine quelques millimètres de côté. Un autre exemple est la construction des moteurs électrostatiques réalisés à partir du microusinage de surface du silicium. Le diamètre caractéristique est de 500 μm [1]. Il existe aussi des micropompes ne mesurant que quelques millimètres. Ces produits miniatures qui comportent une partie électrique et une partie mécanique sont généralement appelés MEMS (Micro Electro Mechanical Systems).

Les dimensions de certaines parties de ces composants sont de l'ordre de grandeur du μm . L'air normal comporte des microparticules dont les dimensions varient entre le millimètre et quelques micromètres. Ces composants sont très sensibles à la présence de ces microparticules lors de leur fabrication ou de leur assemblage. La présence de petites particules de quelques micromètres lors de la fabrication du masque du semi-conducteur, ou lors de l'assemblage des MEMS pourrait nuire au fonctionnement du composant. La fabrication et l'assemblage de tels composants se fait alors sous un flux d'air filtré afin d'éviter qu'une de ces particules soit présente lors d'une manipulation sensible. Ce genre d'environnement à air filtré est appelé *environnement salle blanche*, ou *clean room environment* en anglais. Les salles blanches classiques sont des salles assez grandes dans lesquelles les utilisateurs peuvent circuler pour surveiller les machines de production.

L'encombrement des produits de type MEMS excède rarement le centimètre cube. Pourtant la surface des salles blanches utilisées est en général de plusieurs centaines de mètres carrés. De plus le système de circulation d'air, de filtrage et de récupération nécessite un, voire deux étages de plus.

La dimension de ces salles blanches peut paraître énorme. Elle est néanmoins nécessaire pour des grandes séries de production ou pour la recherche. Dans ces cas, il est nécessaire d'avoir la place pour les grandes machines de production ou encore pour que les chercheurs puissent tester différentes configurations. Par contre les frais de construction, de fonctionnement et de maintenance sont énormes pour des productions en petites séries. Ce projet de thèse est destiné à de telles petites séries de production.

En 2001, le coût de fabrication d'une salle blanche, classe 100, est estimé à 6.000 - 10.000 \$/m². Ce coût inclut l'installation nécessaire pour garantir cette propreté (ventilation, filtres HEPA) et les parois et portes spéciales pour limiter cet espace. Le coût de construction du bâtiment et les équipements nécessaires pour réaliser l'application désirée (robot d'assemblage, machines de photolithographie, etc.) ne sont pas compris dans ce calcul [2].

Un autre facteur qui caractérise la production de ces microsystèmes est la taille des machines utilisées à cet effet. Effectivement, malgré la diminution progressive de la taille de ces produits, la taille des machines qui les produisent reste conventionnelle, elle peut même augmenter.

Les machines qui traitent ces produits ont une masse de plusieurs dizaines (voir centaines) kN, tandis que le poids du produit même est de l'ordre de quelques grammes. Cela a comme conséquence un gaspillage en termes de dynamique, d'énergie, de cadence et de vibration, car pour déplacer des produits de quelques grammes, des mécanismes de plusieurs kilos doivent être mis en mouvement.

Depuis plusieurs années des efforts sont entrepris pour miniaturiser les chaînes de production et les salles blanches. Concernant la miniaturisation des salles blanches, l'idée principale est de maintenir l'environnement propre uniquement autour des machines et des processus, en maintenant les utilisateurs à l'extérieur de cet environnement. Le terme anglais utilisé pour décrire de tels environnements miniatures et propres est *minienvironnement*. Le gain de ces minienvironnements est multiple : Le volume d'air à filtrer est réduit, un des principaux générateurs des microparticules (l'homme) est laissé à l'extérieur de cette zone et le volume occupé par de tels environnements est considérablement réduit. Il est estimé qu'une personne faisant une activité normale perd 6-13 gr. de peau par jour [3]. De plus les conditions à l'intérieur de ces environnements ne doivent plus être compatibles avec les exigences de l'organisme humain. Cela permet de travailler sous un autre gaz que l'air ambiant, avec une humidité et une température adaptées aux besoins du produit.

Le sujet principal de cette thèse est d'établir une aide à la conception de chaînes de production miniatures, nécessitant un environnement de salle blanche. L'objectif est de proposer un concept adapté à un produit donné en quelques heures. Ce concept sera optimisé en termes de temps ou de coût de production (suivant le désir du client).

Les caractéristiques essentielles de cette chaîne de production (appelée microfactory) seront :

- **modularité** : la chaîne sera composée de plusieurs modules (appelés microboxes) ;
- **propreté** : chaque microbox sera une salle blanche miniature dont la propreté sera de classe ISO5 ou meilleure suivant les normes ISO 14644-1 (classe 100 suivant la norme US Federal standard 209E) ;
- **taille** : le volume de travail dans chaque microbox est fonction de la taille et du besoin du produit à assembler. Pour montrer la faisabilité d'une salle blanche miniature, un prototype d'un volume de travail inférieur à 1 dm³ a été étudié et construit ;
- **transportabilité** : vu sa petite taille, la microfactory sera facilement transportable. Il sera ainsi facile d'installer la microfactory à un endroit stratégique pour la production ;
- **temps de nettoyage** : le temps de mise en marche et de nettoyage des microboxes est négligeable (environ deux minutes) en comparaison avec le temps nécessaire pour les salles blanches standard ;
- **manipulateur** : dans chaque microbox un petit manipulateur fait les déplacements et les positionnements grossiers des composants. Pour les positionnements plus précis la collaboration avec un robot de haute précision est possible ;

- **système d'entrée - sortie des composants** : chaque microbox est doté d'un système de sas qui permet d'introduire dans son environnement propre des palettes de composants sans les polluer ;
- **prix** : la petite taille de cette chaîne de production et son concept en général entraînent peu de frais de fabrication, de fonctionnement et d'entretien. De plus, en utilisant des machines plus petites, les masses en mouvement sont réduites, diminuant ainsi l'énergie nécessaire et les vibrations générées.

1.1. Nomenclature

La terminologie utilisée dans ce travail est la suivante :

Minienvironnement : environnement dont la teneur en microparticules est contrôlée localement. C'est un environnement semblable à celui d'une salle blanche, mais son volume couvre seulement la région de travail, là où un tel environnement est nécessaire. L'état de l'art des minienvironnements est présenté au §2.3.

Microfactory : chaîne de production miniature, comportant plusieurs modules. Le §2.2 montre l'état de l'art des microfactories.

Microbox : chaque module de la Microfactory est appelé microbox. Chaque microbox englobe plusieurs machines, ainsi qu'un robot qui fait le transport des composants entre ces machines. Suivant les besoins du produit, un microbox peut avoir un minienvironnement. Dans ce cas tout le volume de travail du microbox est dans un environnement propre.

Pocket Factory : c'est le nom qui est donné au prototype de la Microfactory réalisé durant cette thèse. Elle doit son nom à son volume de travail qui est d'un décimètre cube. Cette Pocket Factory a un minienvironnement propre de classe 10 (ISO 4).

Robot : c'est une simplification du terme "Robot de transfert", car au moyen de ce terme nous voulons décrire tous les mécanismes qui nous permettent de transférer les composants entre les machines à l'intérieur d'un microbox et effectuer de très simples tâches d'assemblage (Exemple : Robot SCARA, Robot Delta, Pick & Place).

Machine : ce terme caractérise tout type de machine qui sert à l'usinage, assemblage, ou contrôle des opérations à réaliser dans la microfactory. Chaque machine est caractérisée par la tâche spécifique à laquelle elle est destinée et par son volume de travail. Toute machine a besoin d'un robot de transfert pour être alimentée en composants qu'elle doit traiter. Ainsi un robot de haute précision, destiné à un alignement très précis des composants, est assimilé à une machine, car son volume de travail est réduit. (Exemples de machines : machine à nettoyer les composants, presse, colleuse, robot de haute précision, dispositif pour contrôler une opération).

Palette : boîtier qui permet de transférer à la fois plusieurs composants vers une microfactory, ou de les sortir à la fin de la chaîne de production. (Exemples : Waffel-Pack®, Gel-Pack®). Pour des applications qui nécessitent un environnement propre, la palette ferme hermétiquement, conservant ainsi un environnement propre à son intérieur. Chaque palette contient des alvéoles destinées à recevoir les composants.

Produit : c'est le produit à assembler dans la microfactory. Un produit est composé de plusieurs composants (Exemple : micropompe, micromiroir, microinterféromètre).

Récepteur ou pièce de base : ce terme désigne le composant du produit sur lequel les autres composants sont fixés.

1.2. Points originaux

Durant ce travail de thèse une méthodologie de conception a été développée et appliquée à des exemples pratiques. La faisabilité de la microfactory a été démontrée à l'aide d'un prototype.

Les points originaux de ce travail portant sur la conception, la modélisation, la réalisation et la caractérisation des composants clés de la microfactory ainsi que la mise au point d'une méthodologie pour définir très rapidement un tel système adapté aux besoins de chaque produit, sont illustrés par les concepts et réalisations suivants :

- une salle blanche de classe 10 (ISO 4) qui est opérationnelle dans un environnement standard. Son volume de travail est d'un dm³.
- un système d'alimentation en air basé sur la filtration de l'air comprimé tiré directement du réseau industriel, par opposition aux systèmes standard qui utilisent des ventilateurs. Cela permet d'avoir un système beaucoup plus compact.
- un homogénéisateur optimisé pour être le plus compact possible qui permet sur moins de 30 mm d'obtenir un flux laminaire à partir d'air comprimé.
- un sas qui permet d'introduire dans la microfactory des composants disposés dans des palettes hermétiquement fermées, en garantissant le maintien de la propreté des pièces.
- un robot miniature à 4 degrés de liberté intégré dans le microbox, qui permet de faire les opérations simples d'assemblage. C'est un robot hybride conçu pour minimiser la génération de microparticules.
- une méthodologie qui permet de concevoir très rapidement une microfactory adaptée aux besoins de chaque produit.

La thèse est structurée de la façon suivante :

Le chapitre 2 présente l'état de l'art de tous les concepts abordés durant ce travail de thèse. Cela concerne les salles blanches, le concept de la microfactory, les minienvironnements et les filtres.

Le chapitre 3 établit et explique la méthodologie de conception d'une microfactory ; pour chaque produit il existe une configuration optimale du point de vue du temps de production ou du point de vue économique. L'influence de différents paramètres est présentée.

Le chapitre 4 apporte les réponses au problème de la conception d'un système de filtration d'air ultra compact, ainsi que les solutions pour la conception d'un système garantissant un flux d'air homogène et laminaire. Les mesures et les expériences pour démontrer le fonctionnement du prototype y sont présentées.

Le chapitre 5 présente plusieurs concepts de microfactory ainsi que le prototype illustrant la faisabilité de cet concept: il s'agit d'un module de la microfactory, appelé microbox. Toutes les parties-clés de ce module ainsi que leurs concepts y sont décrits.

Le chapitre 6 conclut ce travail par une synthèse des problèmes posés et des solutions apportés et propose des améliorations et des nouvelles voies de recherche relatives à la microfactory.

Chapitre 2. Etat de l'art

Ce chapitre présente l'état de l'art correspondant aux principales étapes technologiques qui ont conduit au concept du minienvironnement. Ces étapes sont les salles blanches, les microfactories et finalement les minienvironnements. Au cours de la présentation de chaque concept nous avons mis en évidence ses avantages et les raisons qui ont orienté la recherche vers le concept suivant.

Finalement le principe de fonctionnement et la classification des filtres sont présentés.

2.1. Salles blanches

2.1.1. Historique

Les premiers environnements propres et contrôlés ont été construits pour les hôpitaux. Des biologistes et médecins comme Pasteur, Lister et autres ont compris, il y a plus de 100 ans, l'importance des bactéries dans la contamination. Ils ont ainsi cherché à les éliminer des hôpitaux pour éviter des infections.

La technique de Lister consistait à asperger l'air autour du patient avec de l'acide carbolique (phénol) pour réduire le risque d'avoir des infections dues aux microorganismes qui existent dans l'air. En utilisant cette technique ainsi que le nettoyage des instruments, le port de blouses, de masques et de gants, il a créé les premières salles blanches et des environnements contrôlés pour y opérer les patients [4].

La vraie révolution dans le domaine du contrôle de la contamination a été la technique de la *ventilation positive*. Ce terme signifie l'apport de l'air filtré et propre dans la région contrôlée. L'apport artificiel d'air filtré dans une zone pour en assurer sa propreté est une technique utilisée seulement depuis 60-70 ans. Appliquée d'abord dans les hôpitaux puis dans l'industrie, cette technique permet de mieux contrôler les conditions de l'environnement [5].

Le besoin de développement technologique durant la deuxième guerre mondiale a poussé celui de la technologie des salles blanches. Un environnement contrôlé en termes de microparticules permettait de réduire le taux de rebut pour la fabrication des armes, des chars blindés et des parties critiques des avions. En plus, cela garantissait la qualité des produits.

La recherche dans les domaines nucléaire, biologique et chimique durant la même période a aussi stimulé le développement des environnements contrôlés, ceci tant pour protéger les ouvriers des contaminations dangereuses que pour protéger les produits des contaminations externes.

C'est à cette période que les filtres HEPA (High Efficient Particulate Air) ont été développés.

En 1961 la technique du flux laminaire a été introduite (LAF=Laminar Air Flow). De nos jours le terme de flux unidirectionnel ou UDF (Uni Directional Flow) est souvent utilisé. Bien que les deux termes (LAF et UDF) ne décrivent pas le même type de mouvement de l'air, ils sont utilisés actuellement indifféremment l'un pour l'autre.

Le terme UDF décrit plus exactement la trajectoire de l'air dans l'environnement propre. S'il s'agit d'un flux vertical, il entre au plafond, traverse la pièce verticalement de haut en bas, et il est récupéré à travers un sol perforé avant d'être recyclé. Comme son

nom l'indique, un flux horizontal entre par un mur perforé, traverse la chambre horizontalement, puis est récupéré par un autre mur perforé.

Cette technique de UDF était beaucoup plus performante que l'approche d'injection d'un flux aléatoire et turbulent, qui dilue seulement l'air existant avec de l'air propre. Le flux uniforme expulse les microparticules à l'extérieur de la chambre.

2.1.2. Normes pour la mesure de la propreté

Pour comparer la propreté de ces environnements, il existe plusieurs standards. Dans le cadre de ce projet, les standards les plus importants dans le domaine de l'industrie du semi-conducteur seront présentés. Il s'agit de l'ancien standard US Federal Standard 209 et du standard en vigueur actuellement, ISO14644-1.

Le US Federal Standard 209 établit une correspondance entre la classe de propreté et les concentrations de particules de différentes tailles allant de 0,1 μm jusqu'à 10 μm . La classe de propreté est caractérisée par le nombre des particules de 0,5 μm de diamètre, mesuré dans un pied cube (28,3 dm^3). Ainsi une salle blanche de classe 100 contient moins que 100 particules de 0,5 μm par pied cube. A l'époque des premières applications cette correspondance théorique reflétait ce qui était raisonnable d'attendre des filtres HEPA et des systèmes de mesure.

Les nouvelles techniques de mesure qui comptent le nombre de particules de taille inférieure à 0,1 μm , permettent d'obtenir plus rapidement un échantillon satisfaisant, du fait du nombre plus important des particules fines (taille inférieure à 0,1 μm) en suspension dans l'air. Sur cette même base théorique, d'autres pays ont défini leurs propres référentiels de classifications normalisées plus ou moins comparables, en modifiant parfois l'unité de mesure ou la taille de référence des particules.

Finalement, la norme Internationale ISO 14644-1 est venue uniformiser ces standards. Cette norme est appliquée mondialement (même aux USA) depuis 2001. Cette norme se réfère au logarithme de la concentration des particules de 0,1 μm par mètre cube. Ainsi une classe ISO 5 correspond à une classe qui contient moins de 100.000 particules de 0,1 μm par m^3 . Cela correspond à peu près à 3.520 particules de 0,5 μm par m^3 , soit 100 particules de 0,5 μm par pied³. C'est la classe de propreté 100 suivant le US Federal Standard 209.

Le tableau suivant résume les correspondances entre les deux systèmes. Malgré le nouveau système ISO officiellement en vigueur actuellement, c'est l'ancien US standard qui est encore couramment utilisé par les spécialistes.

Type de classement		Concentration maximale admissible (nombre de particules par unité de volume)											
ISO	US 209	0,1 μm		0,2 μm		0,3 μm		0,5 μm		1 μm		5 μm	
		m^3	pied ³	m^3	pied ³	m^3	pied ³	m^3	pied ³	m^3	pied ³	m^3	pied ³
ISO1		10	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ISO2		100	-	24	-	10	-	4	-	-	-	-	-
ISO3	1	1.000	35	237	7,5	102	3	35	1	8	-	-	-
ISO4	10	10.000	350	2.370	75	1.020	30	352	10	83	-	-	-
ISO5	100	100.000	-	23.700	750	10.200	300	3.520	100	832	-	29	-
ISO6	1.000	1.000.000	-	237.000	-	102.000	-	35.200	1.000	8320	270	293	7
ISO7	10.000	-	-	-	-	-	-	352.000	10.000	83200	2750	2.930	70
ISO8	100.000	-	-	-	-	-	-	3.520.000	100.000	832000	27500	29.300	700

Tableau 1: Correspondance entre la US Federal Standard 209 et la norme ISO 14644-1

2.1.3. La structure d'une salle blanche

Comme nous l'avons expliqué au § 2.1.1, il faut constamment injecter de l'air filtré dans une salle blanche pour maintenir son niveau de propreté. Le but est de nettoyer la salle, mais aussi d'éloigner par la surpression créée toutes les microparticules qui se génèrent durant la production et d'empêcher celles de l'extérieur de s'introduire.

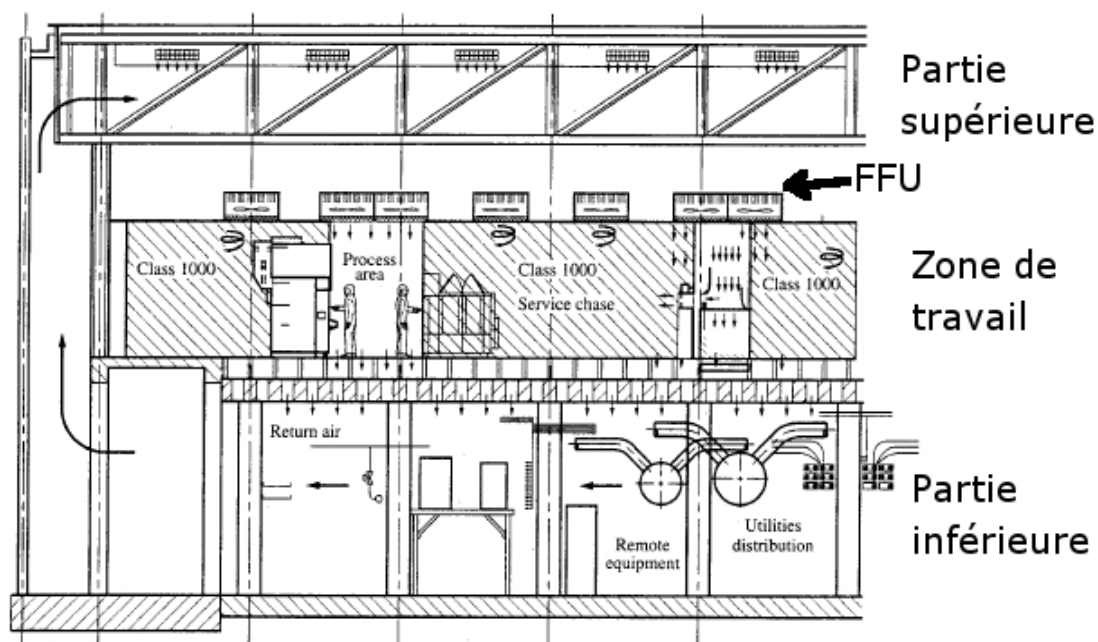


Figure 1: Section d'une salle blanche

Dans la Figure 1, sont présentées les principales parties d'une salle blanche couramment rencontrée dans l'industrie :

partie supérieure : C'est la partie où l'air est filtré avant d'être envoyé à la place de travail de la salle blanche. Son passage par les filtres ainsi que par un tissu spécial permet de former un flux laminaire et homogène.

zone de travail : C'est le cœur de la salle blanche. C'est le volume dans lequel l'air, après avoir été filtré, circule en flux laminaire. Les deux facteurs, qui caractérisent ce flux et qui sont fonction de la classe de propreté recherchée, sont la vitesse de l'air et le taux de renouvellement de l'air de la salle, c'est-à-dire le nombre de renouvellement du volume de l'air par heure. En général dans une salle blanche classe ISO 5 (classe 100 en US Federal Standard, 209E), la vitesse est située entre 0,3 et 0,6 m/s et le taux de renouvellement entre 300 et 600 changements du volume par heure [6]. Dans la Figure 1 l'air est injecté dans la salle blanche à travers les *Filter Fan Units* (FFU), qui sont des boîtiers contenant un ventilateur et un filtre. Dans les parties sensibles où les processus ont lieu, les FFU génèrent un flux laminaire et la classe de propreté est élevée. Entre ces chambres, le flux est turbulent et la classe de propreté réduite ; c'est la partie de service (hachurée dans le schéma). C'est dans cette région que la maintenance des appareils a lieu sans perturber la propreté de la partie affectée aux processus. Les FFU ne couvrent pas toute la région propre. Le taux de recouvrement de la zone est défini en fonction de la propreté demandée pour le lieu en question. Plus la région doit être propre, plus le recouvrement en FFU est grand.

partie inférieure : Dans cette partie l'air, après avoir traversé la zone de travail, est récupéré et mélangé avec de l'air provenant de l'extérieur, puis dirigé vers la partie

supérieure pour recommencer son cycle. En général 10% du volume de l'air est remplacé par de l'air nouveau. Cela est nécessaire pour garantir la quantité d'oxygène indispensable pour le personnel. De plus cela permet d'éliminer les gaz qui peuvent être produits lors des différents processus dans la salle blanche et le CO₂ des expirations. Pour récupérer l'air de la place de travail, le sol et les tables d'une salle blanche sont perforés.

Il est important de remarquer qu'une grande partie du volume de la salle blanche est utilisée seulement pour la circulation et le filtrage de l'air : les ventilateurs et autres appareils nécessaires pour une telle salle.

La recherche dans le domaine du contrôle de propreté contraint de plus en plus à l'établissement d'un environnement propre uniquement autour du produit qui a besoin d'être protégé [7], [8]. C'est selon ce principe que sont construites beaucoup de salles blanches.

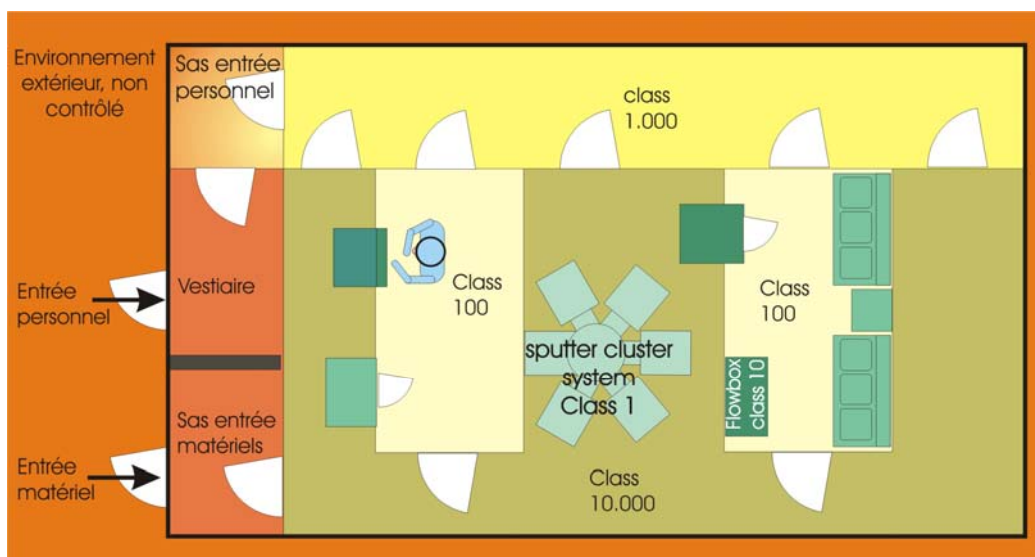


Figure 2: Exemple de parties propres et moins propres d'une salle blanche

Une grande salle blanche est divisée en général en plusieurs zones de propreté différentes comme la Figure 2 le montre. Les procédés de fabrication et de manipulation des microcomposants sont situés dans l'environnement le plus propre. Cela peut être une place de travail ou un flowbox. Cet espace est lui-même placé dans une chambre plus grande, mais moins propre (chambre de classe 100). Cette technique de « poupées russes » permet d'avoir plusieurs barrières de propreté avec des écarts du degré de propreté moins importants que la différence de propreté globale du système, vis-à-vis de l'extérieur. De plus ce n'est pas toute la surface qu'il faut maintenir à un degré de propreté extrême par rapport à l'environnement normal, mais seulement une partie de celle-ci.

Les appareils qui sont utilisés dans les salles blanches sont encastrés dans les murs entre la chambre propre (class 100) et l'environnement gris qui l'entoure (class 10.000). Ainsi les utilisateurs ont accès aux entrées des appareils, tandis que la maintenance se fait par la chambre grise. Les moteurs, ventilateurs et autres parties de ces machines qui peuvent générer des particules se trouvent dans cette partie grise (class 10.000).



Figure 3: Exemple d'un appareil dans une salle blanche (source : CMI-EFPL)

La Figure 3 montre le même appareil vu du côté de la salle blanche (class 100) et vu du côté salle grise (class 10.000). Du côté propre (à gauche) l'utilisateur n'a accès qu'à la porte de l'appareil, tandis que derrière dans la zone grise (à droite), un technicien peut faire des travaux d'entretien ou réparation de l'appareil.

2.2. Microfactory ou microfabrique

Ce paragraphe présente plusieurs projets de microfactories (microfabriques en français), c'est-à-dire des petites chaînes de production. Il a fallu plus d'une décennie pour réaliser ce concept et démontrer sa faisabilité [9], [10], [11]. Vu la parenté entre certains concepts rencontrés dans la littérature et les expositions professionnelles, nous nous sommes limités aux variantes principales :

2.2.1. La première Microfactory au Japon

Au Japon, au début des années '90, par soucis de miniaturisation et d'économie d'énergie, une nouvelle idée de conception est apparue. Il s'agissait du concept d'une chaîne de production aussi petite que possible appelée microfactory [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18]. A part l'économie d'espace, un autre avantage de la miniaturisation est la faible consommation d'énergie. Effectivement, suivant les estimations des concepteurs de cette première microfactory, une réduction de la taille d'un facteur 10 peut réduire la consommation d'énergie d'un facteur 100 [13]. La petite taille des machines réduit les masses en mouvement et économise ainsi de l'énergie tout en augmentant la précision des mouvements. Comme tout le système est plus compact, les distances à parcourir sont plus petites. Cela permet de diminuer le temps de transport entre les stations de production. La petite taille des machines les rend moins sensibles aux dilatations thermiques. Ce concept a pris forme en 1999, avec la réalisation d'une microfactory montée dans une mallette facilement transportable.



Figure 4: La première microfactory construite par le labo MEL au Japon (actuellement IAST)

Cette première microfactory était une chaîne de production miniature. Elle contenait des machines d'usinage et d'assemblage pour la fabrication de microroulements à billes dont le diamètre extérieur était de 0,9 mm avec un axe de rotation de 0,1 mm. Toutes les parties de ce roulement, à part les billes, étaient fabriquées dans cette microfactory [15]. Les machines qu'elle contenait étaient : un microtour, une microfraiseuse, une micropresse, un robot de transfert et un robot de manipulation ayant la forme de deux doigts. L'encombrement extérieur (machines incluses) était de 625 mm x 490 mm x 380 mm et elle pesait 34 kg.

L'idée de ce projet était axée sur la miniaturisation de la chaîne et non sur les conditions d'environnement. En effet elle génère des déchets durant les usinages et elle n'est pas compatible avec une salle blanche.

2.2.2. Minifactory de Carnegie Mellon University

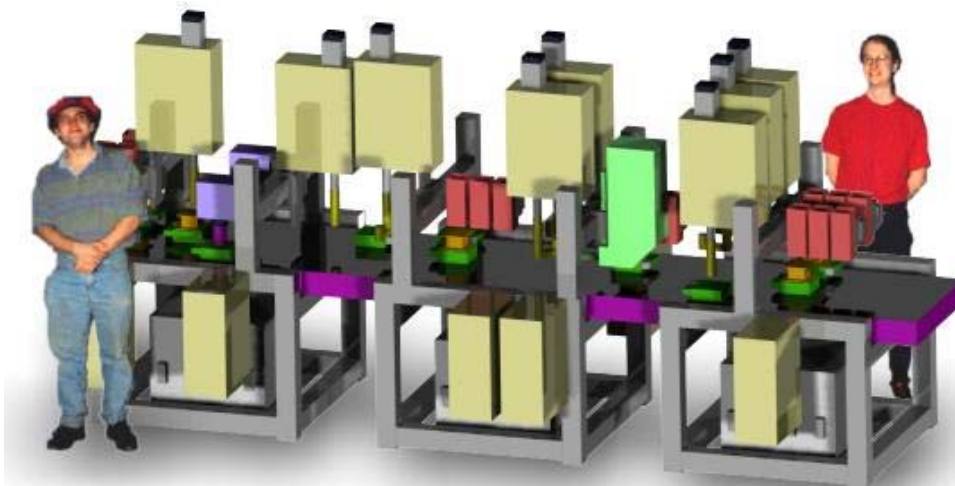


Figure 5: Simulation de la minifactory

Un autre projet illustrant le même concept est celui de minifactory du *Microdynamic Systems Laboratory*, de Carnegie Mellon University en Pennsylvanie aux USA depuis 1998.

Cette équipe a développé un programme nommé "*Architecture for Agile Assembly*" qui aide à la conception de la chaîne d'assemblage et permet de la simuler, économisant ainsi du temps de conception. Pour tester les performances de ce système, un prototype de cette minifactory a été réalisé [19], [20].

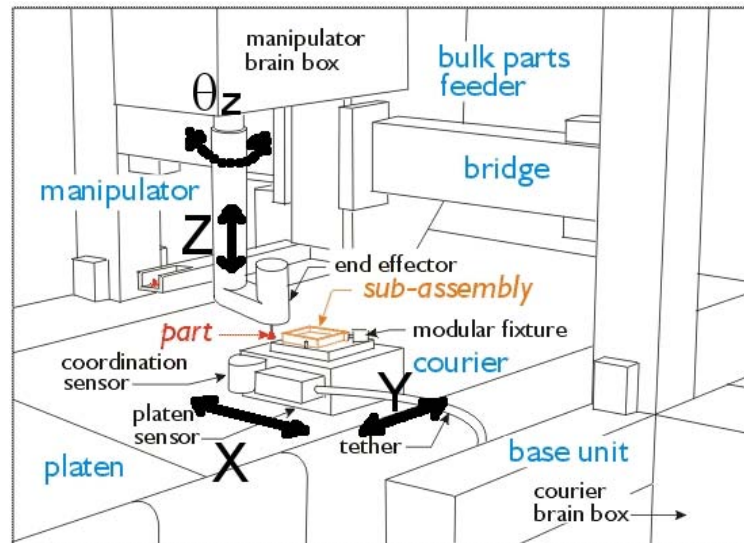


Figure 6: Détail du fonctionnement du chariot et du robot d'assemblage

La minifactory est composée de plusieurs modules. Chaque module comporte une surface de travail sur laquelle, par un système de coussin d'air et d'électroaimants, des chariots se déplacent dans un plan X, Y et se positionnent avec une résolution de 200 nm [21]. Pour réaliser des assemblages ils collaborent avec des robots manipulateurs qui ont 2 degrés de liberté (Z et θ_z). Un système de vision permet de coordonner le tout. Cette minifactory est capable d'assembler un microphone [22].

2.2.3. Microfactory d'OLYMPUS



Figure 7: La microfactory d'OLYMPUS

Le projet de microfactory de l'entreprise OLYMPUS, développé depuis 1991, allait dans la même direction. Ce système permet d'assembler une lentille d'un diamètre de 1 mm, avec une caméra CCD et le support de la lentille. La surface au sol de cette installation est 500 mm x 350 mm (Figure 7) [23].

2.2.4. Microfactory électrochimique

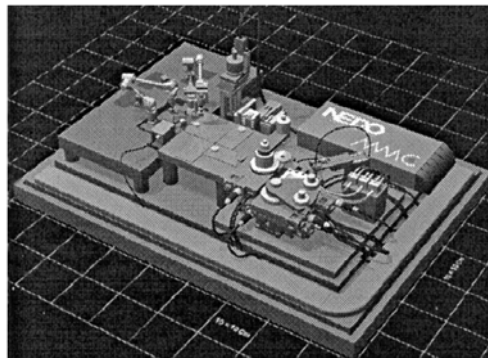


Figure 8: Microfactory pour processus électrochimique

Le système décrit en [24] est une petite microfactory capable d'usiner des micropièces par électrochimie (Figure 8), réalisé par une équipe japonaise. Sa surface au sol est environ 0,9 m x 0,65 m. La surface de travail du processus électrochimique est de 5 x 5 mm². La résolution d'usinage est de 20 μm avec une profondeur de 300 μm . En changeant la polarité des électrodes, il est possible de faire de la déposition de matière, tout comme l'enlèvement par électroérosion. Pour réaliser l'usinage, une pointe est positionnée au dessus de la pièce à usiner. Cette pièce se trouve sur un chariot qui se déplace en X et Y avec une vitesse de 50 $\mu\text{m/s}$.

Pour l'assemblage cette microfactory utilise deux bras robotiques, disposant de 7 degrés de liberté chacun et un convoyeur. Chaque bras n'excède pas 100 mm en longueur et peut se déplacer avec 20 μm de résolution grâce à des moteurs ultrasoniques. Pour la préhension, deux systèmes sont utilisés suivant la nature des pièces à manipuler : le vacuum et un électroaimant. Les pièces peuvent se déplacer entre ces outils suivant deux degrés de liberté, grâce à un système de convoyeur constitué d'une grille de microactuateurs dont chacun a une taille de 1 mm. Ce système peut déplacer des composants pesant jusqu'à 1 g avec une vitesse de 30 mm/s. Un système de caméra CCD permet de coordonner les opérations.

2.2.5. Le AMMS du Fraunhofer Institut

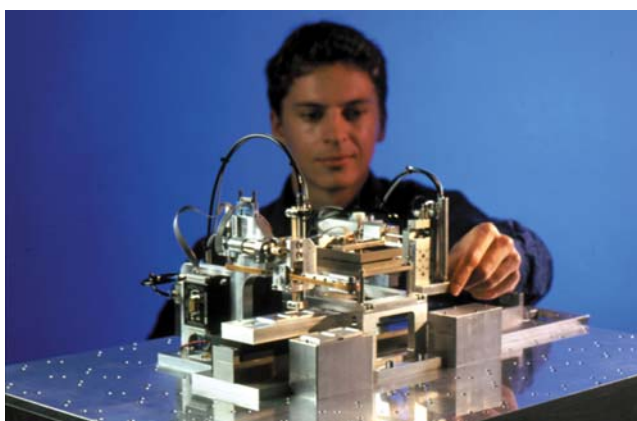


Figure 9: AMMS, la microfactory de Fraunhofer Institut

Le 'Fraunhofer Institut for manufacturing engineering and automation IPA' à Stuttgart a aussi développé un système modulaire de micro assemblage [25], [26], [27], [28], [29]. Les

dimensions des modules sont des multiples de 100 x 100 mm². Ce système appelé AMMS pour *Advanced Modular Micro-Production System*, est composé d'une table standardisée sur laquelle il est possible d'implanter des stations d'assemblage. Cette insertion permet le transfert d'énergie électrique, d'azote, d'air comprimé ou encore du vacuum entre la base et la station d'assemblage. Les pièces sont transférées entre les stations d'assemblage par un système de convoyage à deux degrés de liberté. La précision de positionnement est de 20 µm.

Une interface informatisée permet de concevoir virtuellement cette chaîne d'assemblage et de la tester avant sa réalisation.

2.3. Minienvironnements

Les nouvelles technologies permettent le développement de composants de plus en plus petits. Ces composants sont bien entendu encore plus sensibles aux microparticules présentes dans l'air, d'où la nécessité d'utiliser les salles blanches présentées au §2.1.

D'autre part, la construction et l'assemblage de produits de petites dimensions en petites à moyennes séries, peuvent être plus économiques si elles sont réalisées par des petites chaînes de fabrication et d'assemblage, appelées microfactories. Au §2.2, quelques exemples de ce principe ont été présentés.

La combinaison des deux concepts précédents (de la salle blanche et de la microfactory) nous conduit vers le *minienvironnement*. C'est le concept des environnements très propres couvrant directement le volume de travail (assemblage, fabrication). Ces environnements permettent d'avoir un petit volume de travail avec les caractéristiques d'une salle blanche de classe 100 ou meilleure [30], [31], [32], [33]. Les minienvironnements peuvent être placés dans une salle blanche pour garantir un environnement encore plus propre que celui de la salle blanche même. Ils peuvent aussi générer leur environnement propre de façon autonome, à l'extérieur d'une grande salle blanche.

Ces concepts accompagnés de méthodologies pour une conception rapide permettent de minimiser les coûts de production, d'exploitation et le temps de construction. Ce concept est modulaire et donc facilement adaptable à une nouvelle version du produit. En plus, ces installations peuvent facilement être transportées pour être placées à l'endroit le plus stratégique pour la production ou la distribution.

Ces systèmes ont un faible encombrement comparé aux salles blanches standard. Le volume de l'air à filtrer est plus petit, ce qui réduit les frais d'installation et d'exploitation. Le personnel qui représente une source de contamination importante, est tenu à l'extérieur de cet environnement propre. Il a cependant la possibilité de surveiller la production sans pour autant nuire à la propreté de l'environnement.

Voici quelques exemples réels de tels minienvironnements, dont certains ont atteint le stade industriel :

2.3.1. MA³MST assembleur

La machine d'assemblage de MA³MST développée par NTO, aux Pays Bas [34] est un exemple de minienvironnement. Elle est composée de plusieurs modules. Chaque module contient une machine d'assemblage (robot, dispenseur de colle, système d'alignement, de test, de marquage), ainsi qu'un système de filtration de l'air qui peut garantir un environnement de salle blanche, classe 100. L'encombrement de chaque module est 3220 mm x 1400 mm x 2400 mm pour une masse de 1500 kg.



Figure 10: Le MA3MST assembleur

La Figure 10 représente un assembleur comportant 5 modules. Entre les modules d'assemblage, il y a des interfaces plus petits qui permettent de passer les composants d'un module au suivant sans les contaminer par l'air extérieur. L'alimentation en composants se fait par les bandes "Tape-and-Reel"® qui protègent les composants jusqu'à leur entrée dans l'environnement propre de l'assembleur.

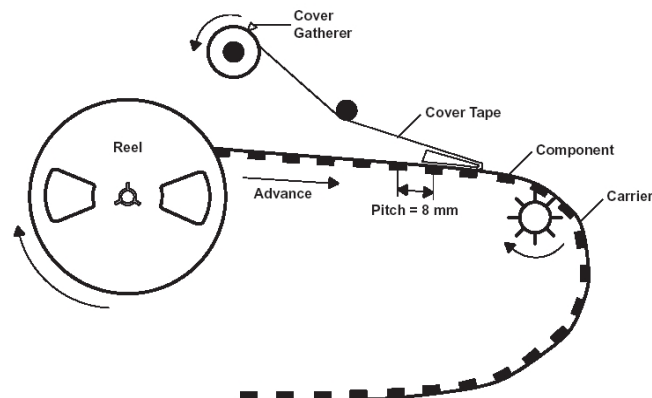


Figure 11: Une alimentation typique avec un Tape-and-Reel

La Figure 11 montre le principe de ce type d'alimentation. Les composants sont placés dans les alvéoles fermées par une bande autocollante dans un environnement propre. Ces alvéoles sont reliées entre elles et enroulées sur une bobine (reel). La bande autocollante est enlevée juste avant l'entrée des composants dans l'assembleur. De cette manière leur propreté est assurée [35].

2.3.2. Consortium DTF

En 2001 un consortium de plusieurs industries japonaises a permis de développer davantage le concept de microfactory [36]. Ce consortium appelé DTF (pour DeskTop Factory) permet de renforcer le concept d'appareils de fabrication et d'assemblage miniatures, mais aussi de modules capables de produire leur minienvironnement propre. Les modules sont standardisés et chaque module exécute une tâche bien précise. Le principe de production est sériel (Figure 12).



Figure 12: Les modules de la DTF

Les modules déjà réalisés sont les suivants :

- Un four pour le traitement thermique : tout en garantissant une classe de propreté de 100, il peut chauffer les composants à 150°C. Un bras robotique intégré permet d'introduire et d'extraire les pièces de ce four.
- Une station de lavage à l'eau pure : Disposant de plusieurs récipients, ce dispositif est capable de laver et de sécher des pièces en une minute.
- Une microstation de lavage au HFE (dégrossier organique): la petite taille du récipient permet d'utiliser chaque fois une petite quantité de ce liquide. Un système condense les vapeurs et recycle ainsi le liquide évaporé. De cette manière, bien que le liquide se contamine plus rapidement en microparticules, son recyclage et le petit volume utilisé chaque fois permettent de minimiser la quantité du HFE nécessaire.
- Un système de transport des palettes entre les stations : Chaque palette est transportée par un petit chariot autonome. Quand le chariot s'arrête devant un des modules pour réaliser une opération, un système sans contacts électriques, charge ses accumulateurs. Chaque chariot dispose d'une mémoire non volatile qui permet au système de contrôler le parcours de ces chariots et d'en décider le trajet.
- Un module de convoyeur entre deux modules d'assemblage.
- Un module d'assemblage composé d'un robot et d'un système de filtration d'air, qui garantit un environnement propre.

2.3.3. TOMI projet en Finlande

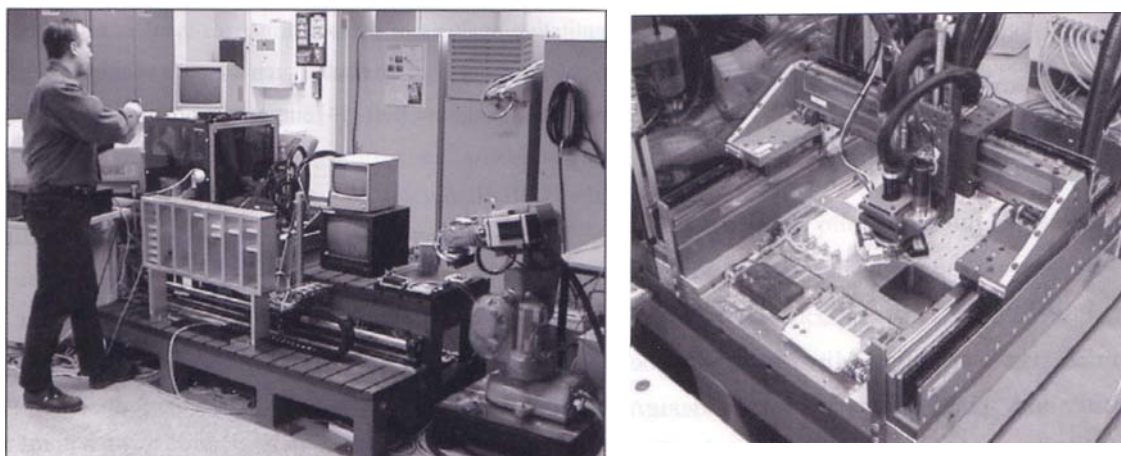


Figure 13: L'infrastructure mécanique pour la TOMI Minifactory (à gauche) et le module d'assemblage (à droite)

Comme le projet de DTF décrit au paragraphe précédent, un projet similaire est en réalisation à l'Université de Tampere, en Finlande [37]. Ce projet, nommé TOMI (Towards Mini and Micro Assembly Factories), a commencé en 2000. Il est fait en collaboration avec *l'Institute of Production Engineering*, le *National Technology Agency in Finland* (Tekes) et 14 industries.

Le but de ce projet est de faire une station modulaire pour l'assemblage de petits mécanismes tels qu'un réducteur planétaire dont le diamètre extérieur est de 8 mm. Le module d'assemblage a une surface au sol de 1800 mm x 500 mm. Il contiendra des stations de production dont chacune a une surface de 500 mm x 500 mm.

L'infrastructure mécanique d'un de ces modules est présentée dans la partie de gauche de la Figure 13. La partie de droite montre en détail le module d'assemblage. Il s'agit d'un robot portique avec 4 degrés de liberté (X, Y, Z, θ_z).

2.4. Les filtres

Dans ce paragraphe nous allons expliquer le principe de fonctionnement des filtres de haute efficacité, comme ceux utilisés dans les salles blanches (filtres HEPA).

2.4.1. Le fonctionnement des filtres

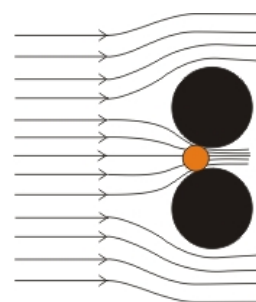
Dans les filtres, l'air à épurer traverse une couche poreuse ou fibreuse dans laquelle il abandonne ses particules. C'est le mode de filtration de l'air actuellement le plus répandu, tant pour la pré-filtration « de protection » que pour la filtration de haute et de très haute efficacité (salles blanches ou salles d'opérations stériles.)

L'interception des microparticules se fait selon plusieurs principes [38]. Une série de petits croquis, ci-après, permet d'illustrer chaque principe. Les fibres du filtre sont toujours représentées en noir.

Tamissage :

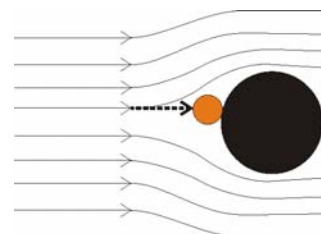
Il faut que les pores de l'élément filtrant aient des dimensions inférieures à celles des particules à retenir. Un amas de particules arrêtées précédemment par le filtre constitue

déjà un tamis filtrant vis-à-vis des particules plus fines arrivant après. Une erreur fort répandue est de penser que la filtration est principalement un effet de tamisage et que le maillage de fibres doit être de plus en plus fin à mesure que la dimension des particules à arrêter diminue. L'effet de tamisage n'a qu'une importance accessoire pour l'efficacité du filtre. Dans le cas d'un filtre mal conçu (maillage des fibres trop fin), cela peut atténuer sa longévité.



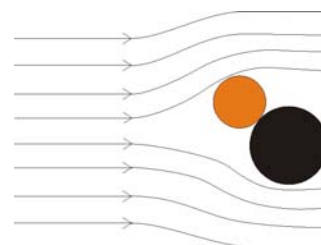
Impact (ou effet d'inertie) :

Les particules lourdes ou à forte vitesse ont une force d'inertie trop grande pour pouvoir accompagner le courant d'air quand celui-ci s'incurve autour d'une fibre. Elles continuent leur trajectoire initiale et s'attachent à la fibre à l'endroit de l'impact. Ce mécanisme est un important facteur de collection pour des particules d'un diamètre plus grand que $0,5 \mu\text{m}$.



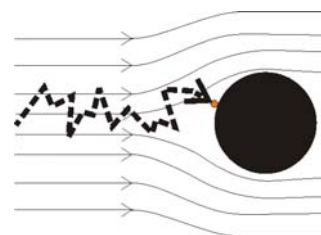
Interception :

Les petites particules légères accompagnent le courant d'air. Au passage près d'une fibre à une distance inférieure à leur rayon, la particule est interceptée par la fibre à cause des forces de Van der Waals. Ainsi, un média filtrant, offrant un bon effet d'interception, doit contenir un grand nombre de fibres fines, du même diamètre moyen que celui des particules à séparer.



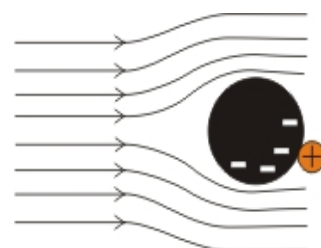
Diffusion :

La trajectoire des particules dont le diamètre est inférieur à $1 \mu\text{m}$ sont suffisamment légères pour que leurs trajectoires soient influencées par des collisions avec d'autres molécules du gaz (mouvement brownien). Elles se fixent sur les fibres rencontrées durant ce mouvement. La probabilité d'impact augmente lorsque la vitesse, le diamètre des particules et le diamètre des fibres diminuent (l'amplitude du mouvement est de $7,4 \mu\text{m}$ pour une particule de $1 \mu\text{m}$ et de $37 \mu\text{m}$ pour une particule de $0,1 \mu\text{m}$) [38].



Forces électrostatiques :

Ce mécanisme augmente l'efficacité du filtre surtout sur les particules inférieures à $1 \mu\text{m}$. Cependant, suivant les conditions atmosphériques (humidité, type de particules ou recouvrement des fibres par les particules), ce mécanisme peut être atténué, voir annihilé dans le temps. Les forces électrostatiques peuvent prendre naissance, soit sur les microparticules, soit sur les filtres. Elles provoquent l'agglomération des microparticules entre elles et facilitent leur filtration.



Ces mécanismes agissent indépendamment, mais leurs actions ne s'additionnent pas nécessairement. La plupart des constructeurs de filtres considèrent comme mécanismes principaux ceux du tamisage, de l'interception, de l'impact et de la diffusion. L'effet électrostatique est souvent négligé, étant assez faible. Cette approche est justifiée pour les cas où il n'y a pas de chargement en électricité statique des particules ou du filtre. Cependant si les particules sont chargées, ou s'il existe un champ électrostatique, il est nécessaire de tenir compte également de ce facteur.

2.4.2. Classification des filtres

Les filtres pour particules utilisent tous ces mécanismes de filtrage et se répartissent en quatre grandes familles :

- Les filtres grossiers ou pré - filtres (filtres gravimétriques) : sont utilisés pour protéger les filtres fins qui suivent, lorsque l'air entrant est très pollué en particules.
- Les filtres fins (filtres opacimétriques) : sont utilisés au niveau des centrales de traitement de l'air. Ils permettent de préserver la propreté de la centrale et donc ses performances. De plus, ils protègent les filtres THE (Très Haute Efficacité) contre les grosses particules, ce qui permet d'augmenter leur durée de vie. Par conséquent le bon choix des filtres est donc important pour réduire les coûts de maintenance.
- Les filtres THE (Très Haute Efficacité) ou HEPA (High Efficiency Particulate Air) : sont les plus proches du processus. Ils ont une efficacité de rétention jusqu'à 99,995% des particules qui sont plus grandes que $0,3 \mu\text{m}$.

Classe des filtres HEPA	Efficacité de filtration (%) pour des particules de $0,3 \mu\text{m}$
H10	85
H11	95
H12	99,5
H13	99,95
H14	99,995

Tableau 2 : Classification des filtres HEPA

- Les filtres ULPA (Ultra Low Penetration Air), sont essentiellement utilisés pour des classes de propreté meilleures que 10. Ils ont une efficacité de rétention jusqu'à 99,99995% des particules plus grandes que $0,12 \mu\text{m}$.

Classe des filtres ULPA	Efficacité de filtration (%) pour des particules de $0,12 \mu\text{m}$
U15	99,9995
U16	99,99995
U17	99,999995

Tableau 3: Classification des filtres ULPA

La classification des filtres HEPA et ULPA est définie par le Comité Européen de Normalisation (CEN), suivant la norme EN 1822-1 :1998.

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les salles blanches et leur fonctionnement, ainsi que les principales normes qui déterminent la classe de la propreté de l'air.

Un effort de miniaturisation des chaînes de production mais aussi des environnements propres, montre qu'il y a un intérêt grandissant pour une combinaison de ces deux concepts : une chaîne de production miniature sous environnement propre. C'est le sujet principal de ce travail de thèse.

Chapitre 3. Méthodologie de dimensionnement du microbox

Ce chapitre présente la méthodologie pour le dimensionnement d'une microfactory. Pour délimiter l'étendu du travail les hypothèses suivantes ont été admises :

- Dans chaque microbox il est réalisé l'assemblage d'un seul composant.
- Les composants entrent dans le microbox par des palettes standardisées.
- Le transfert des composants entre la palette et les stations de travail se fait à l'aide d'un robot de transfert.
- Le transfert des sous-ensembles entre les microboxes se fait soit par ce robot de transfert, soit par un convoyeur, comme on verra par la suite.

Comme ce sera expliqué par la suite, en fonction de la taille de chaque composant à assembler, il existe une palette de taille optimale. La taille de cette palette en combinaison avec le robot à utiliser et les autres machines d'assemblage présentes dans la microbox, définissent la taille minimale de cette dernière.

En prenant comme exemple l'assemblage d'un produit type, les différentes étapes de la méthodologie sont expliquées d'abord pour la recherche de la solution de production la plus rapide, puis pour la solution la plus économique. Finalement, la conclusion permet d'avoir une vision globale de cette méthodologie et d'analyser ses avantages et ses limites.

3.1. Exemple de réalisation d'un produit fictif

Pour faciliter la compréhension de la méthodologie, prenons un exemple de produit fictif. C'est un produit à trois composants : une base percée, un axe à insérer dans cet alésage et un troisième composant optique qu'il faut positionner avec précision par rapport à l'axe et la paroi latérale, avant de le coller. Les dimensions de ces pièces sont de l'ordre du millimètre. Pour éviter la contamination de ce produit par des microparticules, il est nécessaire de l'assembler dans un environnement propre.



Figure 14: Produit imaginaire à 3 composants : la base, un axe et un composant optique

La pièce de base est introduite par un convoyeur à l'air libre et doit être nettoyée par la suite. Les deux autres pièces sont produites et traitées dans des salles blanches de leur fabricant. Elles sont livrées propres dans des palettes hermétiquement fermées qui garantissent la conservation de la propreté à leur intérieur. Après assemblage, toutes les parties sensibles sont protégées. Ainsi le produit fini peut sortir dans l'environnement normal sans protection.

La configuration d'une microfactory capable de faire l'assemblage de ce produit peut être la suivante :

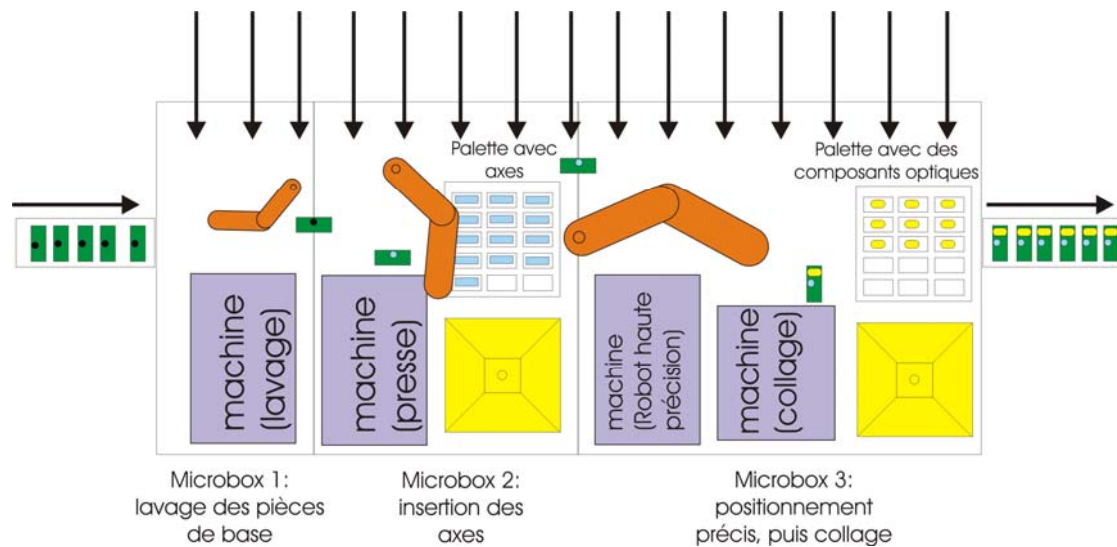


Figure 15: Exemple d'une configuration possible pour une microfactory capable de faire le montage du produit

Cette microfactory est composée de trois microboxes (Figure 15). Dans chaque microbox est traité un composant différent. Ainsi, par exemple le lavage de la pièce de base a lieu dans le premier microbox. Dans le deuxième, le robot apporte la base et prend l'axe de la palette, l'apporte dans la bonne position sous la presse pour faire l'insertion. Dans le troisième microbox, le robot de transfert apporte à un distributeur de colle le sous-ensemble « base-axe » pour poser la colle à l'emplacement du composant optique. Ensuite ce sous-ensemble est transféré vers un robot de haute précision, ainsi que la troisième pièce. Ce robot de haute précision, ajuste la position de la troisième pièce, puis tient l'ensemble immobile jusqu'à la prise de la colle. Finalement le robot de transfert apporte l'ensemble final au convoyeur extérieur.

Si un produit reste sensible aux microparticules après les étapes d'assemblage réalisés dans la microfactory, il faut ajouter un module à la fin qui le met en palettes propres. Ainsi il est transporté dans ces palettes hermétiquement fermées.

A l'aide de cet exemple nous constatons qu'une microfactory est caractérisée par les points suivants :

- Des conditions nécessaires pour les opérations planifiées (propreté, température, gaz pour l'environnement de travail, humidité)
- Le nombre de modules nécessaires
- La taille et une configuration de chaque module (dimension du module, nombre de machines qu'il doit contenir)
- La disposition de ces modules entre eux (en série, en T, en parallèle ou une disposition hybride de toutes ces possibilités). C'est à noter que plusieurs dispositions sont possible pour l'assemblage d'un produit.
- Un coût global (amortissement, fonctionnement, maintenance) optimum
- La cadence de production de cette chaîne de production
- Les machines nécessaires à intégrer

3.2. Introduction de la méthodologie

Le but de cette méthodologie est de proposer un moyen pour pouvoir choisir rapidement la combinaison des composants de la Microfactory qui correspondent le mieux aux besoins de chaque produit. Elle doit répondre aux contraintes d'environnement et incorporer les appareils nécessaires pour la réalisation des opérations. Le tout doit être dans un espace optimal et avec un arrangement qui satisfait aux exigences de la gamme d'assemblage.

L'ensemble doit respecter la cadence de production demandée tout en visant un coût minimal.

Les résultats de cette méthodologie sont :

- Les appareils qui conviennent le mieux pour un produit donné
- La taille estimée de cette Microfactory
- Les conditions d'environnement nécessaires pour chaque module
- La cadence de production
- Le prix de l'installation

Cette méthodologie prend en compte d'une part les machines et robots à disposition pour la réalisation des opérations nécessaires et d'autre part la gamme d'assemblage du produit à réaliser. Elle propose une liste de combinaisons en calculant pour chaque combinaison le prix et la cadence de production. Elle est capable de proposer les meilleures solutions en termes de cadence ou de coût. Finalement, c'est le concepteur qui choisit selon ses préférences la combinaison de la microfactory la mieux adaptée.

Parmi les combinaisons proposées, certaines permettent d'avoir une cadence optimale ou un coût optimal. Pour mieux illustrer l'existence d'une solution optimale concernant la cadence, prenons l'exemple de la taille des palettes.

Les composants arrivent par palettes dans le microbox ; le robot et les autres machines les intègrent dans le produit, puis les palettes vides sont évacuées et remplacées par des nouvelles, remplies de nouveaux composants. Considérons par exemple que la somme des temps des opérations est inférieure à la somme des temps de déplacements du robot ou de chargement/déchargement de la palette. Du point de vue de la cadence de production, il existe une taille optimale pour les palettes. Effectivement, si des palettes de très grande taille sont utilisées, le système aura une grande autonomie, mais le robot de transport devra faire de grandes courses et l'essentiel du temps de production sera employé au déplacement des pièces. Dans le cas contraire, si de très petites palettes sont utilisées, l'autonomie du système sera tellement faible, que l'essentiel du temps de production sera consacré au chargement/déchargement des palettes. Il existe alors une taille optimale des palettes qui permet d'atteindre l'optimum de la cadence de production.

La méthodologie développée aux paragraphes qui suivent aidera le concepteur à trouver très rapidement la combinaison de ces paramètres (robots, machines, palettes) qui lui permettra d'avoir une cadence maximale, respectivement un coût minimal de la microfactory.

3.3. Organigramme de la méthodologie

Aux paragraphes suivants nous avons analysé les points précédemment présentés et leur influence dans la conception de la microfactory. Cette méthodologie implique que dans chaque microbox sont effectuées toutes les opérations pour l'assemblage d'un

composant. Pour chaque microbox et en fonction des composants et des opérations qui y auront lieu, la configuration optimale sera trouvée, puis en combinant ces microboxes, la proposition de la microfactory la mieux adaptée pour le produit en question sera déterminée.

Cette méthodologie prend en compte toutes les possibilités de combinaisons entre les robots à utiliser, les machines nécessaires et les différentes palettes disponibles pour l'amenée des pièces. Cette démarche est faite à l'aide d'un programme permettant de trouver toutes les combinaisons et contrôler leur compatibilité avec le travail désiré. Il calcule pour les combinaisons possibles les paramètres utiles, tels que la cadence de production, le coût de l'installation, le temps d'autonomie, etc.

La Figure 16 montre l'organigramme de la démarche.

La première partie du programme permet de constituer une base de données de tous les paramètres utiles pour les machines d'assemblage, les robots de transfert, les palettes, mais aussi celles de la microfactory.

La partie concernant la gamme d'assemblage liée au produit enregistre toutes les informations que le constructeur connaît sur son produit :

- le nombre et le type des composants,
- leur taille,
- les conditions de livraison (type d'emballage, conditionnement),
- les conditions d'assemblage,
- les opérations nécessaires pour l'assemblage de chaque composant. (Le terme "opérations" inclut toutes les actions nécessaires à l'assemblage, les mouvements du robot de transfert compris).

Après l'établissement de la gamme d'assemblage relative au produit considéré, toutes les combinaisons possibles entre les opérations, les machines, les robots et les palettes sont établies. Une partie de ces combinaisons sont éliminées à ce stade pour différentes raisons d'incompatibilité (p.ex. la surface de travail du robot n'est pas suffisante pour parcourir toute la palette de grande taille ou encore les conditions d'environnement du produit ne sont pas compatibles avec celles des machines). Si la base de données ne contient aucune machine ou robot qui satisfait les conditions d'assemblage, il n'y aura aucune solution proposée. Ce sera alors à l'utilisateur d'agrandir la base de données avec des robots et machines qui pourront satisfaire le cahier des charges.

Pour les combinaisons valables on estime le temps d'autonomie de la machine et autres paramètres utiles pour chaque opération, comme le temps et le coût de fabrication.

La combinaison des solutions les meilleures pour chaque opération va constituer un scénario pour la microfactory. A ce stade, il est nécessaire de synchroniser le flux de production pour tous les microboxes. Cette vérification peut montrer qu'une vitesse de production moindre de certains microboxes peut être favorable pour obtenir une homogénéité des flux dans la chaîne de production.

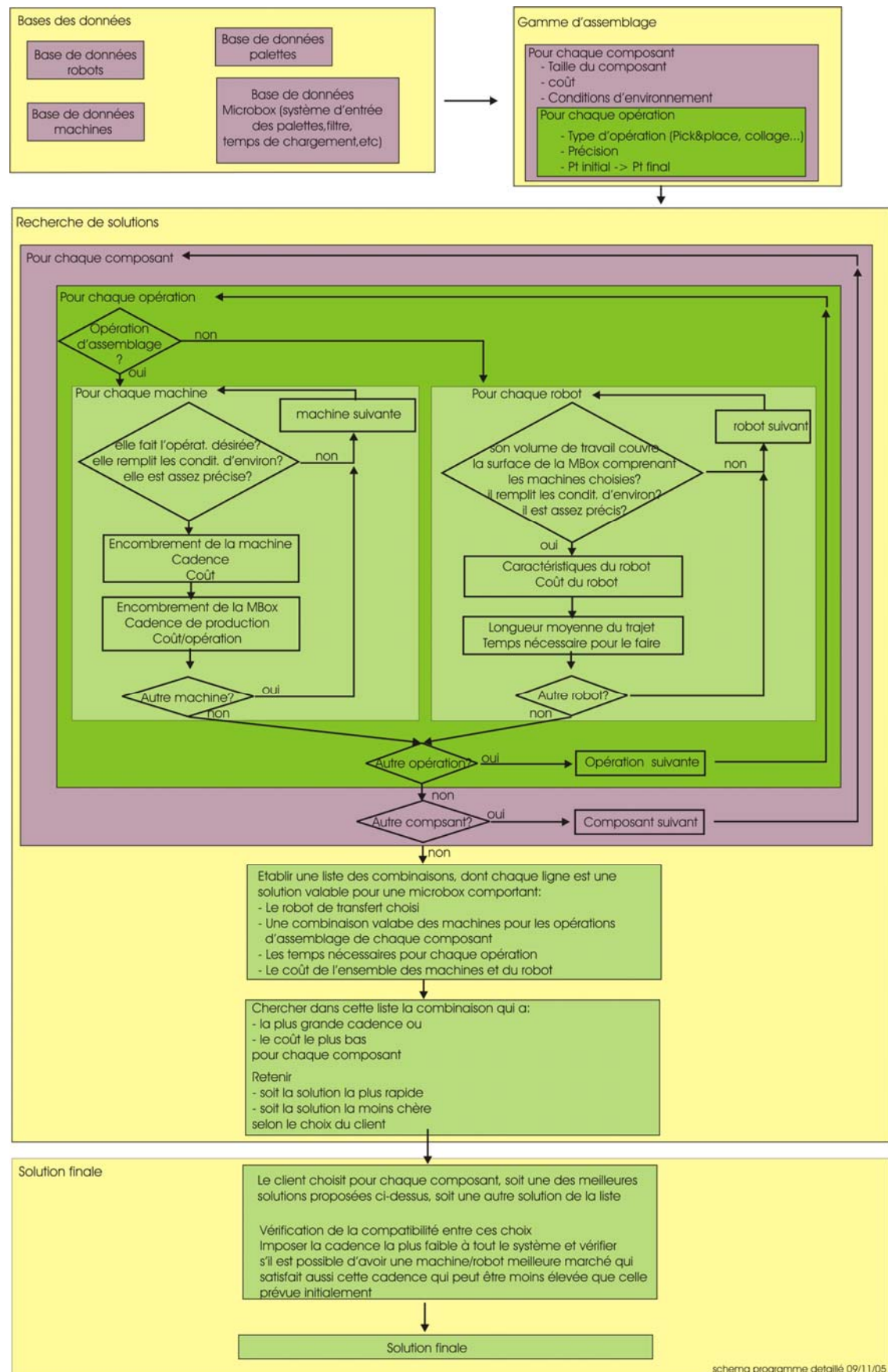


Figure 16: Organigramme de la méthode de conception

Pour mieux illustrer ceci, reprenons notre exemple :

Supposons que la cadence de production du premier et du deuxième microbox est de 200 pièces/h et celle du troisième est de 150 pièces/heure (dû au temps nécessaire pour le début de la polymérisation de la colle). S'il n'existe pas d'autres stratégies pour améliorer la cadence du troisième microbox, et vu que c'est une production en série, il est inutile de pousser la cadence des deux autres microboxes à leur maximum, car cela va engendrer un engorgement. Ainsi, si tous les microboxes ont une cadence de 150 pièces/h, il peut être intéressant d'utiliser des robots de transfert moins rapides (donc moins chers) pour les deux premiers microboxes et atteindre une cadence de 150 pièces/h pour tous les microboxes.

Si la cadence d'un des microboxes est plus petite que la moitié de la cadence des autres microboxes, ou si le client désire à tout prix garder une cadence donnée, un dédoublement du microbox avec la cadence la plus faible devrait être envisagé.

La comparaison de ces scénarios aidera à faire le choix final du scénario à retenir. Les paragraphes suivants décrivent le développement de ces étapes.

3.4. Etapes de la méthodologie de conception

La méthodologie de conception recherche toutes les combinaisons possibles pour la réalisation de la microfactory, estime la cadence de production et le coût, et propose les meilleures solutions. Pour augmenter l'efficacité de cette méthodologie nous avons développé un programme, écrit en langage C++ à l'aide du C++ Builder de Borland.

Cette méthodologie sera expliquée par la suite, à l'aide des « fenêtres » de ce programme en utilisant comme exemple le montage du composant fictif décrit au §3.1.

Comme montré sur l'organigramme de la Figure 16, la méthodologie se compose de 4 parties principales. En lançant le programme, trois des quatre parties principales de la méthodologie apparaissent (Figure 17).

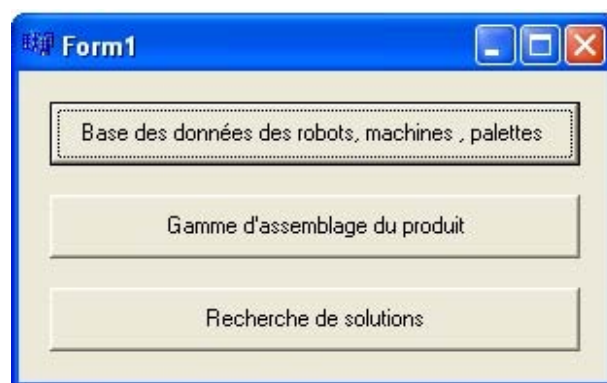


Figure 17 : Le trois parties principales de la méthodologie sont visibles sur le menu principal du programme de la méthodologie

Les paragraphes suivants expliquent chaque étape de la méthodologie.

3.5. Base de données de l'équipement de la microfactory

Pour pouvoir établir des scénarios possibles de la configuration de la microfactory, il est nécessaire d'avoir une base de données concernant les caractéristiques des robots, machines et palettes susceptibles d'être utilisés pour réaliser la configuration de la microfactory. Plus précisément :

Une liste de machines qui peuvent réaliser et/ou contrôler les opérations nécessaires et une autre pour les robots nécessaires pour manipuler les pièces. Pour chacun de ces appareils il faut connaître :

- La dénomination de la machine ou du robot
- Le volume de travail du robot
- La précision
- Le prix
- La vitesse et l'accélération maximales, s'il s'agit d'un robot de transfert ou la cadence s'il s'agit d'une machine
- La classe de propreté avec laquelle l'appareil est compatible
- L'encombrement
- La durée de vie de la machine (en nombre d'opérations). Si la fréquence d'utilisation de la machine fait que sa vie sera inférieure à 1 ans, on prend en compte le nombre des opérations qu'elle va réaliser. Sinon on admettra par défaut une durée d'amortissement d'un an.

La base de données complète peut contenir encore plus que des informations techniques de chaque machine/robot, comme les dessins techniques, les points de fixation, etc. Ces données sont gérés par l'utilisateur.

Une liste de palettes standardisées. Plus précisément pour chaque palette les informations suivantes sont nécessaires :

- La dénomination de la palette
- L'encombrement extérieur de la palette ($p \times p$)
- La surface utile de la palette ($p' \times p'$)
- Le jeu minimum à prendre en considération pour l'alvéole qui va contenir le composant (j)
- L'épaisseur minimale des parois entre les alvéoles (jc)
- La hauteur maximale utile
- La matière avec laquelle la palette a été fabriquée, ainsi que sa compatibilité avec l'environnement

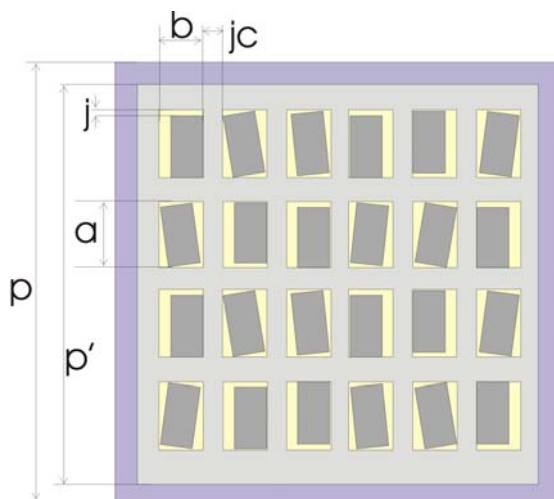


Figure 18: Dimensions caractéristiques d'une palette

Une liste des systèmes pour amener les pièces. Elle contiendra :

- Le principe d'amenée des pièces ou les palettes (convoyeur, introduction de la palette, bol vibrant, introduction manuelle, etc.)
- La compatibilité ou non avec un environnement spécial
- L'encombrement
- Le prix de l'installation ou le salaire du personnel si l'introduction se fera manuellement
- Le temps d'introduction
- Le temps de chargement du système avec des composants

La démarche informatisée permet de remplir la base de données des robots, machines et palettes (Figure 19). Pour chacune de ces familles, il est possible d'ajouter de nouvelles données, effacer celles qui ne sont plus valables ou encore modifier directement les valeurs des paramètres.

Form2

Machines Robots Palette Microbox

Opération	Nom	Précision [um]	Cadence Pces/h	Prix [CHF]	Encombrement extérieur[mm]			Volume à l'intérieur[mm]			Exploitation Nbre opérations
					Hauteur	Largeur	Longueur	Hauteur	Largeur	Longueur	
1 soudage	soudeuse1	1	140	14000	140	422	111	11	111	11	200000
2 insertion	presse1	30	230	2000	205	316	147	25	35	14	400000
3 insertion	presse2	20	560	8000	200	200	300	10	10	10	100000
4 insertion	presse3	30	250	5000	245	230	145	45	78	12	300000
5 collage	colleuse1	20	700	15000	100	784	52	40	30	20	710000
6 collage	colleuse2	10	500	200000	200	100	100	20	10	30	150000
7 nettoyage	laveuse	1000	5000	5000	200	200	200	20	20	20	360000

Add Delete

Save + Exit

Figure 19: Le programme donne la possibilité d'ajouter ou soustraire de données sur des machines, robots ou palettes, ainsi que de les modifier

Comme présenté dans l'exemple de la figure ci-dessus, il est tout à fait possible de mettre dans la base de données, les informations pour plusieurs machines qui font la même opération (ici des presses et des colleuses). La méthodologie montrera par la suite quelle est la machine la plus adaptée pour notre application.

3.6. Gamme d'assemblage du produit

Le terme *gamme d'assemblage du produit* signifie toutes les informations que le fabricant doit donner concernant le produit qu'il souhaite réaliser.

Notre méthodologie va se baser sur ces informations pour établir les scénarios pour chaque microbox et elle va proposer des résultats concernant le coût de fabrication, la cadence ou encore le temps d'autonomie de chaque microbox.

La gamme d'assemblage se divise en trois parties (voir Figure 20) concernant :

- La production en sa globalité,
- Les caractéristiques de chaque composant,
- Les propriétés de chaque opération

Les informations importantes concernant la production sont :

- Le coût désiré du produit
- Le volume de production annuel de ce produit
- Les conditions d'environnement
- Le nombre de composants du produit
- L'autonomie de production désirée
- La gamme d'opérations (elle est donnée indirectement en remplissant l'ordre des opérations à effectuer)

The screenshot shows the CDCharges software interface. It is divided into several sections:

- Informations concernant le produit globalement:** Includes fields for 'Nom du produit', 'Coût désiré/pièce[CHF]', 'Production Annuelle', 'Temps d'autonomie [min]', 'Conditions environnement', 'produit final', 'Classe de propreté', and 'Nom du fichier'. There is a 'Load File' button.
- Schéma indicatif représentant les positions des machines:** A schematic diagram showing the layout of machines (machine 1, machine 2, palette) and components (h1, h2, Couverture) with input/output points (IN, A, B, P, Out).
- Informations concernant chaque composant:** A table with columns for 'Component1', 'Component2', 'Component3', and 'Component4'. Each component has fields for 'Nom Composant', 'Matière', 'Longueur[mm]', 'Largeur [mm]', 'Hauteur[mm]', 'Coût[CHF]', 'Gaz Spécial', 'Nom opération', 'Type Opération', 'Durée [s]', 'Precision', and 'Position Initiale'.
- Informations concernant les opérations relatives à chaque produit:** A table with columns for 'Opération', 'Type Opération', 'Durée [s]', 'Precision', 'Position Initiale', and 'Gaz Spécial'. It lists four operations: op1 (pick&place), op2 (collage), op3 (pick&place), and op4 (pick&place).

Buttons at the bottom include 'Add composant', 'Delete Composant', 'Add opération', 'Del opération', and 'Exit + Save Product'.

Figure 20: Les parties de la fenêtre concernant la gamme d'assemblage du produit

Le coût, la cadence et l'autonomie sont donnés à l'origine par le client dans le cahier des charges. Après estimation des paramètres de la microfactory, nous connaissons le coût de réalisation.

Caractéristiques importantes pour le dimensionnement du microbox de chaque composant :

- La dénomination du composant
- Sa géométrie et ses dimensions
- Les tolérances, les emplacements par lesquels la préhension est possible et les côtes fonctionnelles

- Les matériaux
- Les conditionnement de livraison.

Dans le cadre de ce travail, il est admis qu'en général les composants sont livrés propres et ordonnés dans des palettes. Si ce n'est pas le cas, il faut prévoir une station qui fait ce conditionnement. Si un composant ne peut pas être référencé lors de sa saisie, une opération supplémentaire doit être considérée. Cela peut être le déplacement du composant vers le champ de vision d'une caméra, ou un alignement contre des butées.

Informations à connaître pour chaque opération :

- Le nom de l'opération
- Le type de l'opération (collage, alignement, soudage, etc.)
- La précision ou autres exigences requises par le client
- La durée de l'opération
- Les manipulations nécessaires à effectuer avant l'opération (manipulation de la pièce, alignement, etc.)
- Les conditions d'environnement à respecter avant et durant chaque opération (propreté, gaz pour l'environnement de travail, humidité, température....).
- Le type de machine spécifique nécessaire pour réaliser cette opération et ses caractéristiques.

Le temps nécessaire pour exécuter une opération est donné par la cadence de la machine qui va effectuer cette opération à laquelle s'ajoute un temps spécifique à l'opération. Ainsi, pour un collage nous devons ajouter au temps résultant de la cadence de la colleuse, le temps nécessaire au début de la polymérisation de la colle pour assurer la stabilité avant l'opération suivante.

Les contrôles nécessaires à effectuer pour s'assurer de l'efficacité de l'assemblage sont considérés comme des opérations.

L'établissement de cette gamme d'assemblage doit se faire en étroite collaboration avec le client lui-même, car il connaît bien les différentes propriétés et contraintes de chaque composant du produit.

C'est donc à cette étape qu'il faut déterminer s'il est nécessaire d'avoir un environnement propre, une régulation en température ou humidité, ou encore de travailler dans un environnement d'un gaz spécial (N_2 , He_2 ou autre) ou stérile et à quelle partie de la microfactory ces conditions doivent être appliquées.

La démarche informatisée propose une interface pour faciliter cette étape. Le schéma indicatif en haut à droite de la Figure 21 aide à visualiser les déplacements que le robot de transport devrait faire. La position "**IN**" symbolise l'emplacement où le robot du microbox précédent a posé le sous-ensemble qu'il a traité, et la position "**OUT**" est la position où le robot va poser le sous-ensemble à la fin de sa tâche. Chaque opération est exécutée sur les positions "**A**", "**B**", ... en fonction du nombre de machines qui sont nécessaires pour l'assemblage du composant en question. Les coordonnées de ces points seront calculées par la suite, selon la combinaison des machines que le programme proposera d'utiliser.

The screenshot shows the CDCharges software interface. At the top, there are input fields for product name, cost per piece, production volume, autonomy time, and cleanliness class. A schematic diagram on the right shows a layout with points IN, A, B, P, and Out, and machines 1 and 2. Below the inputs is a table for components and operations.

Component	Nom Composant	Matière	Longueur(mm)	Largeur (mm)	Hauteur(mm)	Coût(CHF)	Gaz Spécial
1	base	ceramique	3	2	0.2	0.05	Air

Nom opération	Type Opération	Durée (s)	Précision	Position Initiale	Classe Proprete
1	transport1	transport	Résultante	100	P
2	lavage	nettoyage	Résultante	1000	A
3	transport2	transport	Résultante	50	A
4	retour_robot	transport	Résultante	50	OUT

Figure 21 : Fenêtre de la gamme d'assemblage avec l'exemple d'un produit

Pour faciliter la compréhension de cette méthodologie, reprenons l'exemple présenté au §3.1. Comme mentionné, la première pièce (la base) sera traitée dans le premier microbox.

L'ordre des opérations à l'intérieur de ce microbox est :

- Le convoyeur amène la base au microbox au point "IN". Le robot la prend du point "IN" et la pose à l'emplacement de la première machine, désigné ici par le point "A".
- Le nettoyage a lieu à l'emplacement "A". (Le transfert est indiqué comme A-A).
- Après le nettoyage le robot prend le composant et le met à la position "OUT", d'où le robot du microbox suivant va le prendre pour la suite des opérations.
- Finalement le robot retourne à la position "IN" pour commencer un nouveau cycle d'opérations.

Remarque : les points des opérations sont des positions qui se succèdent (IN-A, A-A, A-OUT, OUT-IN). Le point final d'un trajet est le point initial du trajet suivant car ces points décrivent la suite des trajets que le robot doit faire.

En continuant ainsi la méthodologie pour chaque composant de notre produit, la gamme d'assemblage du produit est établie.

Il est à noter que, pour les opérations de transfert, il n'est pas nécessaire d'introduire la durée, vu qu'elle est estimée en fonction du trajet à effectuer et des performances du robot. Par contre il est indispensable d'indiquer la durée, si elle ne dépend pas seulement de la cadence de la machine qui la réalise, mais aussi d'un autre facteur. Par exemple pour un collage la durée dépend de la cadence avec laquelle la colleuse pose la colle et du temps nécessaire à une polymérisation suffisante de la colle.

3.7. Recherche de solutions

Dans cette phase de la méthodologie, la base de données des machines, robots et palettes disponibles est constituée, de même que la gamme d'assemblage du produit pour lequel il faut concevoir la microfactory.

La phase suivante consiste à faire toutes les combinaisons possibles entre les opérations nécessaires pour l'assemblage et les machines qui vont le réaliser. Avant de faire les calculs sur le temps d'opération ou sur le coût, il est nécessaire de trier ces combinaisons pour ne garder que celles qui remplissent certains critères logiques.

Ces critères sont :

- La machine choisie doit pouvoir faire l'opération demandée.
- Le volume de travail du robot doit couvrir au moins la taille de la palette choisie, augmentée du volume de travail de la machine avec laquelle il va collaborer, plus la distance entre la palette et la machine.
- Les conditions d'environnement doivent être respectées.
- La précision de la machine ou du robot doit être suffisante.

Les combinaisons qui remplissent ces critères sont potentiellement réalisables. Pour chaque opération, on calcule les paramètres de chaque combinaison de machines, robots et palettes. Il est possible ainsi de comparer le temps de production, le coût et la surface occupée par chaque combinaison. De cette manière, il est facile de choisir celle qui est la plus appropriée.

Un deuxième contrôle permettra de synchroniser le flux de production et vérifier la compatibilité de l'environnement entre les microboxes. (Phase expliquée au §3.10.).

Un autre critère important est le temps d'autonomie de la machine. Effectivement, si la production utilise une petite palette qui doit être chargée souvent, cela impliquera une intervention humaine très fréquente. Cela peut induire de tels coûts de personnel qu'il serait préférable d'avoir une palette plus grande mais qui nécessite d'être chargée à intervalles beaucoup plus longs.

La démarche informatisée permet de voir toutes ces combinaisons et l'estimation de la cadence et du coût. Le tableau supérieur de la Figure 22 nous montre toutes les combinaisons possibles. Chaque ligne contient la dénomination du composant, la palette utilisée et le nombre des composants qu'elle transférera. Sont affichés également la cadence estimée et le coût de production qui tient compte du coût des machines que cette combinaison propose. Ensuite sont affichés le robot qui va effectuer les transferts entre les différentes positions, la dénomination de chaque opération de transfert, la distance de chaque trajet, ainsi que le temps de parcours du robot concerné.

Suivent les dénominations des autres opérations d'assemblage. Pour chaque opération nous pouvons voir la dénomination de la machine choisie pour l'exécuter, ainsi que le temps nécessaire pour cette opération. A la fin de la ligne nous trouvons le temps qui déterminera la cadence pour cette combinaison.

La Figure 22 montre les résultats pour le produit décrit au §3.1. Dans la base de données nous avons enregistré 4 types de palettes standardisées, deux robots de transfert (robot1 et robot2) et une machine pour le nettoyage des composants de base. Cela fait 8 combinaisons pour le premier composant (la base).

En appuyant sur le bouton "Trier par temps" ou "Trier par coût", le programme choisit les combinaisons selon le temps ou le coût minimal.

Resultats

Toutes les resultats valables (sont testés: compatibilité opérations, précision, volume de travail du robot)

No	Composant	Palette	Nbre comp	Auton[min]	Temps[s]	Coût[CHF]	Robot	Nom opér	Type opér	Dist[mm]	Durée[s]	Nom opér	Type opér	Dist[mm]	Durée[s]	Nom
1	base	2"	108	26.35	14.64	0.55	robot1	transport1	transport	61.67	4.97	transport2	transport	68.16	5.22	retou
2	base	4"	374	128.89	20.68	0.78	robot1	transport1	transport	141.81	7.53	transport2	transport	138.25	7.44	retou
3	base	5"	378	146.05	23.18	0.87	robot1	transport1	transport	181.94	8.53	transport2	transport	173.83	8.34	retou
4	base	6"	572	241.98	25.38	0.95	robot1	transport1	transport	221.45	9.41	transport2	transport	208.97	9.14	retou
5	base	8"	924	444.59	28.87	1.08	robot1	transport1	transport	291.00	10.79	transport2	transport	270.95	10.41	retou
6	base	2"	108	18.78	10.43	8.35	robot2	transport1	transport	61.67	3.51	transport2	transport	68.16	3.69	retou
7	base	4"	374	91.29	14.64	11.72	robot2	transport1	transport	141.81	5.33	transport2	transport	138.25	5.26	retou
8	base	5"	378	103.42	16.42	13.13	robot2	transport1	transport	181.94	6.03	transport2	transport	173.83	5.90	retou
9	base	2"	108	26.35	14.64	0.09	scara	transport1	transport	61.67	4.97	transport2	transport	68.16	5.22	retou
10	base	4"	374	128.89	20.68	0.13	scara	transport1	transport	141.81	7.53	transport2	transport	138.25	7.44	retou
11	base	5"	378	146.05	23.18	0.14	scara	transport1	transport	181.94	8.53	transport2	transport	173.83	8.34	retou
12	base	6"	572	241.98	25.38	0.16	scara	transport1	transport	221.45	9.41	transport2	transport	208.97	9.14	retou

Calculer

Trier par temps Trier par coût

Meilleurs résultats triés par rapport au temps d'exécution

No	Composant	Palette	Nbre comp	Auton[min]	Temps[s]	Coût[CHF]	Robot	Nom opér	Type opér	Distance[m]	Durée[s]	Nom opér	Type opér	Distance[m]	Durée[s]	Nom op
6	base	2"	108	18.78	10.43	8.35	robot2	transport1	transport	61.67	3.51	transport2	transport	68.16	3.69	retour_1
18	cylindre	2"	216	63.87	17.74	14.73	robot2	transport1	transport	41.11	2.87	transport	transport	70.91	3.77	transpo
30	pièce	2"	108	34.36	19.09	58.22	robot2	transport	transport	32.38	2.54	transport	transport	68.39	3.70	transpo

Exit

Figure 22 : La fenêtre des résultats de la méthodologie

Si plusieurs combinaisons ont le même temps déterminant ou le même coût, toutes sont affichées. Dans cet exemple c'est la solution numéro 5 qui est choisie : C'est la combinaison d'une palette de chargement de 2", avec le robot 2 et la machine de nettoyage (elle n'est pas visible sur la Figure 22 par manque de place). En triant les solutions par coût, le choix se portera sur les solutions 1 et 5 (voir partie supérieure de la Figure 22).

Par la suite l'utilisateur pourra choisir les combinaisons qu'il juge préférables pour constituer sa microfactory. Le programme fera encore une vérification de compatibilité entre les différentes combinaisons.

3.8. Estimation du temps de production

L'optimisation du concept de la microfactory se fait suivant deux critères : le coût et le temps de production. Dans ce paragraphe on procède à l'analyse des calculs nécessaires à l'estimation de la cadence de production. En revanche le §3.9 contient ceux pour estimer le coût de production.

La solution finale dépend des besoins du client. Il lui incombera de dire si c'est le temps de production ou le coût qui est prioritaire pour la production.

Dans ce paragraphe nous allons démontrer que la taille des palettes influence directement la cadence de production. La taille des palettes dépend directement de la surface que les composants occupent dans la palette. Ainsi cette méthode permet de

proposer pour chaque microbox, en fonction de la taille des composants, la palette la mieux adaptée. Cette méthodologie propose de ne travailler qu'avec des palettes standardisées. Alors ce modèle nous aidera à choisir la taille standard de la palette la plus appropriée pour notre application.

A partir de la taille de la palette et des machines à utiliser dans chaque module, nous pouvons définir la taille du microbox. En combinant ainsi les configurations optimales obtenues pour chaque microbox, nous définissons la configuration optimale du point de vue cadence de la microfactory. Cette relation entre la taille de la palette et la cadence n'est pas valable si une opération est plus longue que le temps de transfert des composants. Dans un tel cas, le transfert des composants se fait pendant l'opération et n'influence ainsi pas la cadence. Ce paragraphe analyse le cas où le temps de transfert est plus long que l'opération.

Dans cette méthodologie toutes les opérations nécessaires pour l'assemblage d'un composant sont faites dans un même microbox (transfert du composant, alignement, insertion, collage, polymérisation, etc.). Dans cette étude nous calculons la cadence de production par microbox.

Le temps de production pour chaque microbox est composé de 3 parties :

- Le temps nécessaire pour les assemblages, manipulations ou contrôles des composants
- Le temps nécessaire pour transférer les composants entre les stations de travail et les palettes à l'intérieur du microbox.
- Le temps nécessaire pour charger et décharger la palette

Analysons maintenant chacune de ces parties :

Le temps nécessaire pour les assemblages, manipulations et contrôles d'un composant : Ces opérations sont réalisées par plusieurs machines. C'est pour cela qu'elles peuvent être exécutées en temps masqué. Le temps déterminant est le temps de l'opération la plus lente. Ainsi pour l'assemblage de chaque composant :

$$T_{ass} = \text{Max}(T_a, T_m, T_c) \quad (1)$$

Où :

T_{ass} est le temps d'assemblage du composant [s]

T_a est le temps nécessaire pour tous les assemblages du composant [s]

T_m est le temps nécessaire pour toutes les manipulations du composant [s]

T_c est le temps nécessaire pour tous les contrôles du composant [s]

Le temps nécessaire pour transférer les composants ou les sous-ensembles entre les stations d'assemblage. En général nous comptons ici le temps nécessaire au robot, pour transférer les composants à une certaine distance à l'intérieur de la station. Ce temps s'arrête dès que le composant est posé sur la station d'assemblage, manipulation ou contrôle.

Ce temps dépend de la vitesse maximale du robot, du temps d'accélération nécessaire, ainsi que du temps nécessaire à la prise et à la pose des composants. Soit n le nombre de déplacements que le robot devra faire, d'une distance $dist_i$ chacun. La Figure 23 montre le diagramme de vitesse en fonction du temps: T_{acc} représente le temps d'accélération ou de freinage du robot (Trajet 1), T_{prise} et T_{pose} est le temps de prise et de pose du composant respectivement.

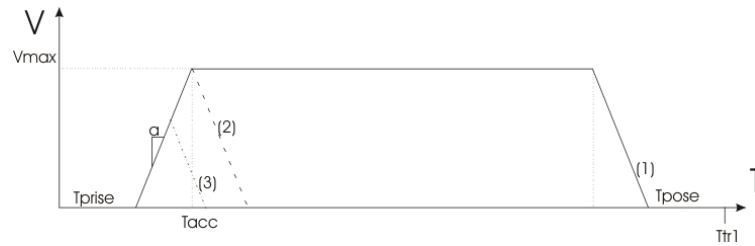


Figure 23: Profil de vitesse du robot

Le temps total des déplacements est donc :

$$\begin{aligned} dist_i &= \frac{1}{2} V_{\max} \cdot T_{acc} + V_{\max} \cdot (T_{trtot} - 2T_{acc} - T_{prise} - T_{pose}) + \frac{1}{2} V_{\max} \cdot T_{acc} \Leftrightarrow \\ T_{trtot} &= \sum_i^n \left(\frac{dist_i}{V_{\max}} + T_{acc} + T_{prise} + T_{pose} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Si la distance à parcourir est plus petite que la distance que le robot parcourt lors de son accélération et freinage (trajets 2 et 3), c'est-à-dire si $dist_i < T_{acc} \cdot V_{\max}$, alors :

$$T_{trtot} = \sum_i^n \left(\sqrt{\frac{4dist_i \cdot T_{acc}}{V_{\max}}} + T_{prise} + T_{pose} \right) \quad (3)$$

Comme chaque microbox ne dispose que d'un seul robot de transfert, le temps total de transfert est la somme de ces temps. Par contre comme nous allons voir plus loin, il est possible de réaliser une opération pendant que le robot transfère un composant.

Le temps nécessaire pour charger et décharger la palette. Dans le cas général où une station contient plusieurs palettes (N_{pal}) et que certaines d'entre elles sont chargées/déchargées en parallèle (N_{paral}), nous ne comptons ce temps qu'une seule fois. Ce temps est réparti en fonction du nombre de composants que la palette transporte :

$$T_{chtot} = (N_{pal} - N_{paral}) \sum_{N_{pal}} \frac{T_{ch}}{N_p} \quad (4)$$

Ce temps diminue si le nombre de pièces transportées par palette augmente.

Dans le cas de notre prototype les opérations de transfert et chargement/déchargement des palettes ne peuvent pas se faire en même temps, car le robot de la microfactory doit tenir la porte de cette dernière pendant le chargement/déchargement de la palette, comme c'est détaillé au §5.2.5. De plus une seule palette est prévue par microbox ($N_{pal}=1$, $N_{paral}=0$). Par contre les autres opérations peuvent être exécutées pendant le transfert des composants entre les stations. C'est pour cette raison que la cadence (donc le temps de production) par microbox est déterminée comme suit:

$$\Leftrightarrow T_{tot} = \text{Max} \left(\text{Max}_n(T_a, T_m, T_c), T_{trtot} + \frac{T_{chtot}}{N_p} \right) \quad (5)$$

Où :

$dist_i$	=	Distance parcourue par le robot pendant le trajet i [mm]
V_{\max}	=	Vitesse maximale atteinte par le robot [mm/s]
T_{acc}	=	Temps pendant lequel le robot accélère/freine [s]

	=	$V_{\max}/\text{accélération}$
T_{ch}	=	Temps de chargement de chaque groupe des palettes [s]
N_p	=	Nombre de composants que transporte la palette p
N_{pal}	=	Nombre de palettes avec des composants différents.
N_{paral}	=	Nombre de palettes qui se chargent/déchargent en même temps qu'une autre (p. ex : si nous avons 3 palettes dont 2 se chargent en parallèle, $N_{\text{paral}}=1$, car la 3 ^{ème} se charge en même temps que la 2 ^{ème}).
T_{ass}	=	le temps d'assemblage, manipulation et contrôle d'un produit [s]
T_{trtot}	=	temps nécessaire pour transporter le sous-ensemble d'un poste d'assemblage au suivant [s]
T_{chtot}	=	le temps de chargement / déchargement d'une palette [s].

Pour mieux illustrer ces calculs, nous proposons ci-après deux exemples de configurations différentes de microfactories. Le but de ces exemples est d'illustrer l'influence de la taille des palettes sur la cadence de production. Pour pouvoir visualiser cela, nous avons admis que la surface du microbox est égale à 4 fois la surface de la palette.

Dans le premier exemple, une microfactory sans convoyeur est composée de plusieurs microboxes alignés où une seule opération a lieu dans chaque microbox. Chaque robot prend le composant que le robot précédent lui a donné, procède à l'assemblage, puis le passe au microbox suivant.

Le deuxième exemple concerne une microfactory où chaque robot ne fait que l'assemblage : un convoyeur se charge de déplacer les sous-ensembles d'un microbox au suivant.

3.8.1. Configuration de microboxes en série sans convoyeur

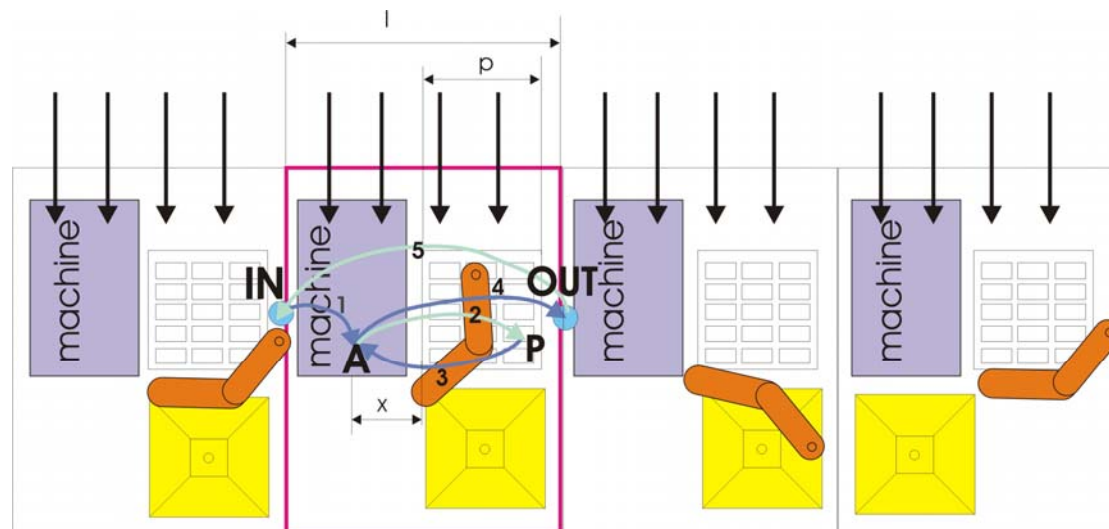


Figure 24: Configuration linéaire de la microfactory sans convoyeur

Les microboxes sont placés les uns à côté des autres et une opération est effectuée à chaque microbox. Chaque robot ajoute un composant au sous-ensemble et le passe au microbox suivant pour que son robot ajoute aussi un composant. Cette opération est répétée autant de fois qu'il est nécessaire jusqu'à l'assemblage de tous les composants. Quand un robot achève sa tâche de sous – assemblage, il place le sous-ensemble en position "OUT" qui est en même temps la position "IN" pour le microbox suivant.

Chaque déplacement du robot, ainsi que chaque opération d'assemblage effectuée dans la machine est décrite comme une opération de déplacement. Pour chaque opération l'utilisateur indique quelle est la position initiale et finale du composant.

Quand ces points sont les mêmes, cela implique qu'il n'y a pas de transfert et qu'il s'agit d'une opération d'assemblage exécutée par la machine. Si par contre les deux points sont différents, il s'agit d'une opération de transfert, exécutée par le robot.

Chaque opération (même les trajets "à vide") est détaillée ainsi. Pour avoir un cycle complet, il faut qu'à la fin du cycle, le robot se trouve à nouveau à la position initiale.

Prenons l'exemple de la Figure 24 ; les trajets que le robot doit faire durant un cycle sont les suivants (les distances considérées sont expliquées par la suite) :

- Trajet 1 : Prendre le composant de la position **IN** et l'amener à la position **A** (déplacement de **IN** à **A**). La distance moyenne de ce trajet est $\ell/2$.
- Trajet 2 : Aller chercher un composant de la palette (déplacement de **A** à **P**). La distance moyenne de ce trajet est $x + p/2$.
- Trajet 3 : Apporter le composant de la palette à la place de l'opération (déplacement de **P** à **A**). La distance moyenne de ce trajet est $x + p/2$.
- Trajet 4 : Après assemblage, apporter le sous-ensemble à la position **OUT** pour qu'il soit accessible par le robot suivant (déplacement de **A** à **OUT**). La distance moyenne de ce trajet est $\ell/2$.
- Trajet 5 : Retourner à la position **IN** pour commencer le prochain cycle des opérations (Déplacement de **OUT** à **IN**). La distance de ce trajet est ℓ .

Le robot va faire 3 trajets utiles (1, 3 et 4) et 2 trajets à vide pour se placer aux positions nécessaires (2 et 5). Dans cet exemple une seule machine est utilisée par microbox. Nous faisons l'hypothèse que la surface de la microfactory est au moins le quadruple de la taille de la palette (car il faut de la place pour poser le couvercle après l'ouverture de la palette, plus de la place pour l'opération d'assemblage). Ainsi la largeur du microbox ℓ est égale à deux fois la largeur de la palette p .

Il est clair qu'en réalité il est possible d'avoir plusieurs machines d'assemblage par microbox et que leur taille peut être plus grande ou plus petite que celle de la palette. Néanmoins l'exemple considéré ici permet de voir l'étroite relation qui existe entre la taille des composants et la taille optimale du microbox.

Dans cet exemple la longueur totale parcourue durant les trajets 1 et 4 correspond à la largeur du microbox, donc ℓ (même si le point **A** n'est pas au milieu de la microbox, la somme de ces deux distances est égale à ℓ). Ce mouvement a 4 phases d'accélération et de décélération.

Les trajets 2 et 3 sont en moyenne égaux à la demi - largeur de la palette (p) plus une distance x qui dépend de la distance entre la machine et le bord de la palette. Cette distance (x) est notée comme une distance horizontale pour faciliter la compréhension du dessin et des calculs.

Ainsi l'équation (2) : $T_{trtot} = \sum_i^n (\frac{dist_i}{V_{max}} + T_{acc} + T_{prise} + T_{pose})$ devient :

$$T_{trtot} = \sum_i^5 \left(\frac{trajet_i}{V_{max}} + T_{acc} + T_{prise} + T_{pose} \right) =$$

$$\left(\frac{l/2}{V_{max}} + T_{acc} + T_{prise} + T_{pose} \right) + \left(\frac{x + p/2}{V_{max}} + T_{acc} + T_{prise} + T_{pose} \right) +$$

$$\left(\frac{x + p/2}{V_{max}} + T_{acc} + T_{prise} + T_{pose} \right) + \left(\frac{l/2}{V_{max}} + T_{acc} + T_{prise} + T_{pose} \right) +$$

$$\left(\frac{l}{V_{max}} + T_{acc} + T_{prise} + T_{pose} \right) \quad (6)$$

$$\Leftrightarrow T_{trtot} = \left(\frac{l}{V_{max}} + 2T_{acc} \right) + 2 \left(\frac{p/2 + x}{V_{max}} + T_{acc} \right) + \left(\frac{l}{V_{max}} + T_{acc} \right) + 5 \cdot T_{prise} + 5 \cdot T_{pose} =$$

$$\Leftrightarrow T_{trtot} = \frac{2l + p + 2x}{V_{max}} + 5(T_{acc} + T_{prise} + T_{pose}) \quad (7)$$

Le nombre des composants que contient une palette est fonction de la surface de la palette, de la surface que le composant occupe et du taux de remplissage de la palette (r).

$$N_n = \frac{SurfPal \cdot r}{SurfComp} \quad (8)$$

Ainsi en regroupant le tout et en faisant intervenir la surface de la palette, du microbox et du composant, nous avons :

$$T_{tot} = \text{Max} \left(T_{ass}, \frac{T_{chtot} \cdot surfComp}{surfPal \cdot r} + \frac{2\sqrt{SurfMbox} + \sqrt{surfPal} + 2x}{V_{max}} + 5 \cdot (T_{acc} + T_{prise} + T_{pose}) \right) \quad (9)$$

Pour illustrer cette démarche, voici une application numérique avec les valeurs suivantes :

V_{max}	= 100 mm/s	: Vitesse maximum que le robot peut atteindre
T_{chtot}	= 5 sec	: Temps de chargement/déchargement de la palette
SurfComp	= 15 mm ²	: Surface occupée par le composant sur la palette
SurfMbox	= 10.000 mm ²	: Surface de la Mbox (ici 100 mm x 100 mm)
SurfPal	= variable	: Surface de la palette [mm ²]
r	= 0,6	: Taux de remplissage de la palette en surface
T_{ass}	= 2 sec	: Temps d'assemblage, de manipulation et de contrôle des composants, inférieur au temps de transport + chargement/déchargement de la palette
T_{acc}	= 0,2 sec	: Temps d'accélération/freinage du robot (profil trapézoïdal)

T_{prise}	= 0,2 sec	: Temps de prise du composant
T_{pose}	= 0,2 sec	: Temps de pose du composant
x	= 20 mm	: Distance entre le bord de la palette et l'endroit où a lieu l'opération.
ℓ [mm]		: largeur du microbox. $\ell^2 = \text{SurfMbox}$
p [mm]		: largeur de la palette. $p^2 = \text{SurfPal}$, aussi $2p = \ell$.

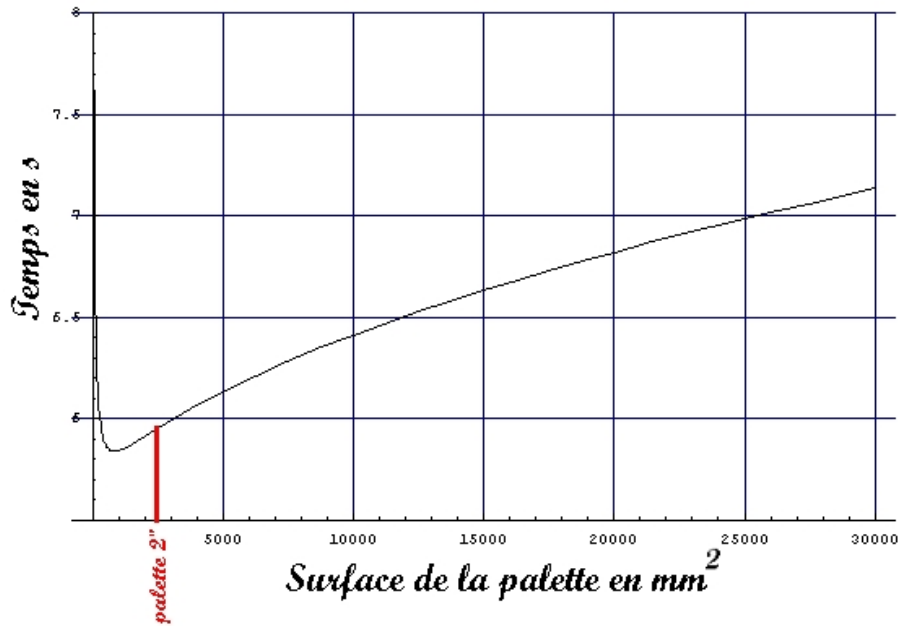


Figure 25: Variation du temps global d'assemblage en fonction de la taille des palettes

Dans cet exemple le temps d'assemblage est plus petit que le temps de transfert entre les stations plus le temps de chargement. Ainsi le temps d'assemblage n'intervient pas. Nous constatons que la surface de la palette a un optimum pour lequel le temps d'assemblage est minimal. Ce minimum est obtenu en annulant la dérivée par rapport à la surface de la palette de la fonction (9). Ainsi nous avons :

$$\frac{dT_{\text{tot}}}{d(\text{surfPal})} = \frac{-\text{surfComp} \cdot T_{\text{chtot}}}{r \cdot \text{surfPal}^2} + \frac{1}{2\sqrt{\text{surfPal} \cdot V_{\text{max}}}} = 0 \quad (10)$$

Cette équation résolue par rapport à la surface de la palette devient :

$$\text{surfPal} = \sqrt[2]{\frac{2 \cdot V_{\text{max}} \cdot \text{surfComp} \cdot T_{\text{chtot}}}{r}} \quad (11)$$

Comme nous pouvons voir sur la Figure 26, cette équation nous permet de trouver la taille de la palette optimale pour chaque composant. Cette fonction dépend également de la vitesse du robot, de son temps d'accélération et du temps de chargement.

Construire une nouvelle palette pour chaque composant serait excessivement coûteux. Ce graphe nous permet de faire mieux correspondre le composant considéré aux familles de palettes déjà existantes dans le commerce. Actuellement il existe des palettes de 2" x 2" ~ (50 mm x 50 mm), 4" x 4" ~ (100 mm x 100 mm), 5" x 5" ~ (127

mm x 127 mm) et 6" x 6" ~ (152 mm x 152 mm), signalées sur la Figure 26 par des traits mixtes.

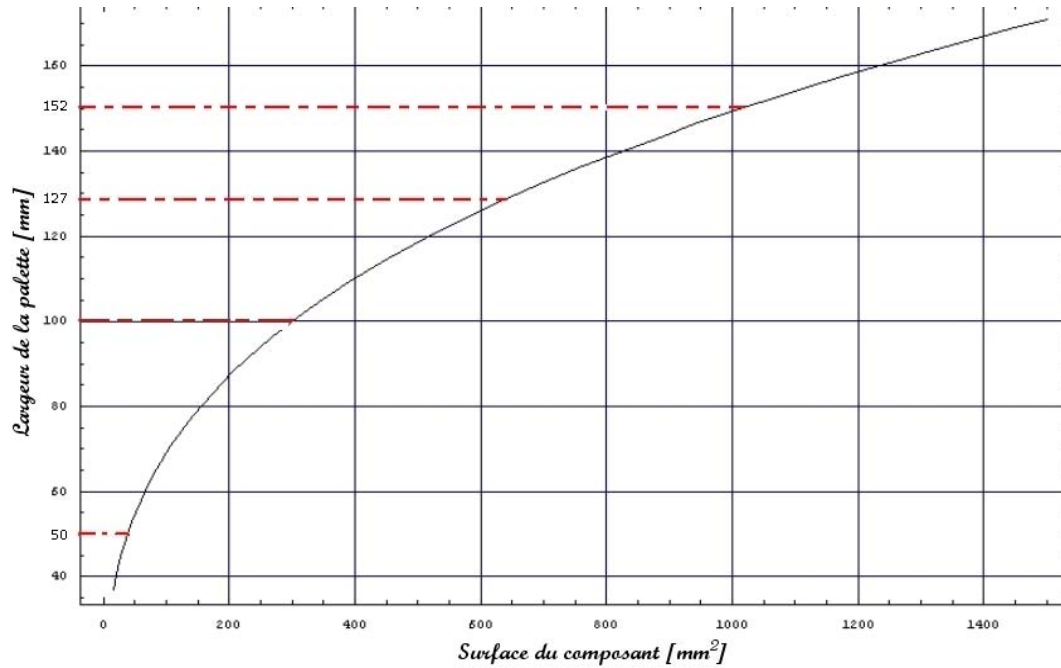


Figure 26: La largeur optimale de la palette correspondant à la surface du composant

Cette méthode nous permet de faire un lien grossier entre la surface des composants et la taille de la palette la mieux adaptée en fonction des caractéristiques du microbox. Effectivement pour ce calcul le taux de remplissage a été considéré comme une constante et la surface de la palette comme résultante. En plus ce graphe ne nous permet pas de définir clairement quel est le meilleur choix pour les composants dont la taille ne correspond pas exactement à une palette.

En réalité la fonction (9) n'est pas continue du fait que le nombre des composants qu'il est possible de mettre sur une palette est un nombre entier. En tenant compte de cette considération et en imposant que la surface du microbox doit être la plus petite possible, c'est à dire $\text{SurfMbox} = 4 \text{ SurfPal} = 4p^2$, la formule (9) devient :

$$T_{\text{tot}} = \text{Max} \left(T_{\text{ass}}, \frac{T_{\text{ch}} \cdot (a + j)(b + j)}{\text{Ent} \left(\frac{p'}{a + j + jc} \right) \cdot \text{Ent} \left(\frac{p'}{b + j + jc} \right)} + \frac{6p + 2x}{V_{\text{max}}} + 5 \cdot (T_{\text{acc}} + T_{\text{prise}} + T_{\text{pose}}) \right) \quad (12)$$

où $\text{Ent} (p'/(a+j+jc))$ est la partie entière de la division de la largeur utile de la palette (p') par la largeur du composant (a) plus le jeu de l'alvéole (j) et l'espace qu'il faut laisser entre les alvéoles (jc).

En appliquant la formule (12) pour un composant de la même surface (3 mm x 5 mm), la Figure 25 se transforme comme montre la Figure 27:

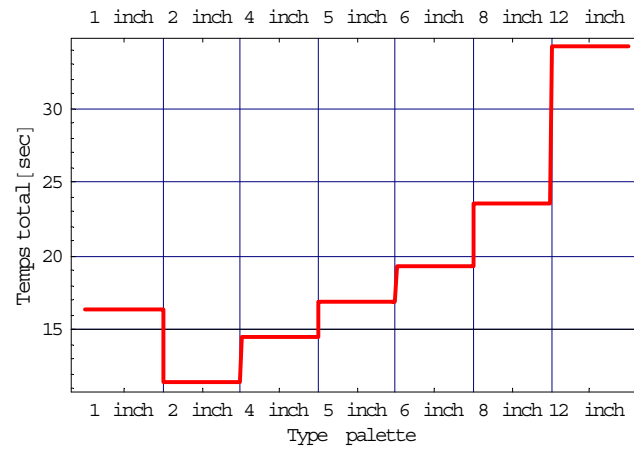


Figure 27: Temps d'assemblage en fonction des palettes de taille standardisée

La palette de taille d'un inch n'est pas standardisée, mais elle est représentée ici pour permettre la comparaison avec la Figure 25.

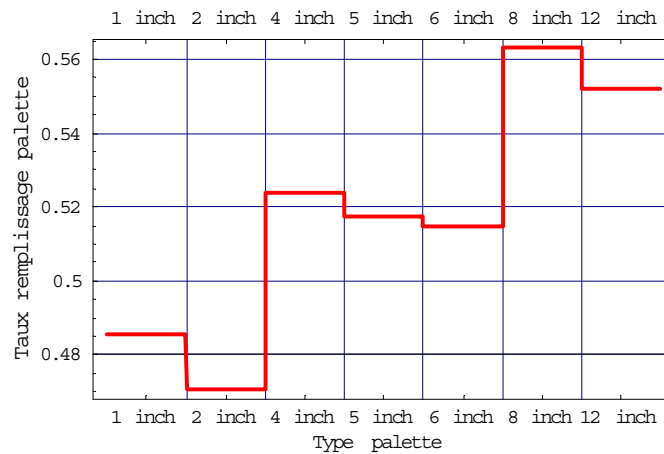


Figure 28: Taux de remplissage des palettes standardisées pour un composant de 3 x 5 mm

Dans ce dernier cas, le taux de remplissage de la palette n'est pas une constante comme précédemment, mais une résultante comme nous pouvons le voir sur la Figure 28. Il est donné par la formule suivante :

$$r = \frac{Ent\left(\frac{p'}{a + j + jc}\right) \cdot Ent\left(\frac{p'}{b + j + jc}\right)}{p^2} \quad (13)$$

La Figure 29 montre le nombre de pièces que nous pouvons placer par palette. Sur une palette de 2", il est possible de mettre 10 pièces.

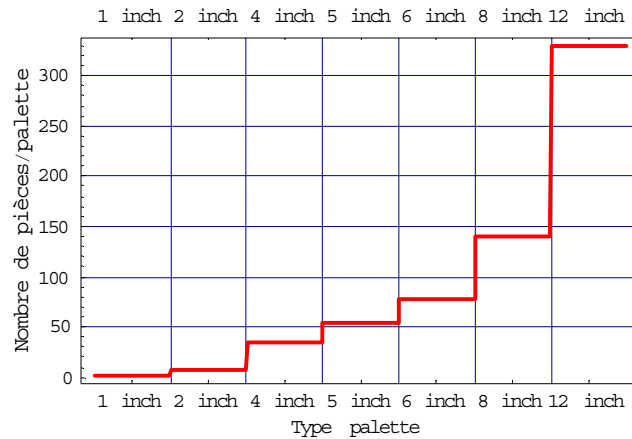


Figure 29: Nombre des pièces en fonction de la palette standardisée utilisée

Ainsi, pour cet exemple de composant (3 mm x 5 mm) et avec les caractéristiques de ce robot, les palettes de 2" sont les mieux adaptées, car pour ces palettes le temps d'assemblage est le plus court (10,5 sec).

Cet exemple veut montrer l'importance que peut avoir la taille de la palette sur la cadence. La méthodologie permet d'examiner aussi les autres paramètres comme la taille du robot dont nous avons besoin pour couvrir la surface de cette palette, son prix, le volume et le nombre de machines nécessaires, etc.

Un autre paramètre est le temps d'autonomie. Pour cette palette il est de 105 sec (1,75 min). Il faut donc analyser s'il est plus avantageux de charger la palette tous les 1,75 min ou avoir un robot plus rapide et donc plus cher, mais qui peut desservir une palette plus grande afin d'augmenter l'autonomie du système.

3.8.2. Configuration utilisant un convoyeur

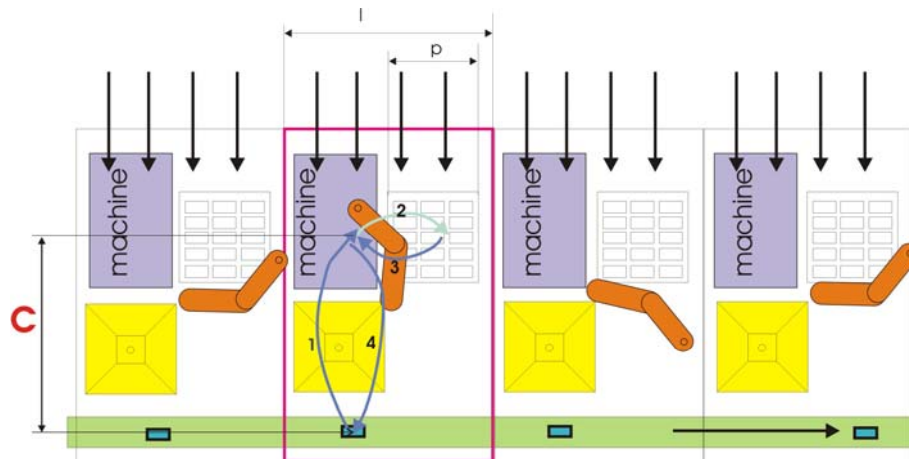


Figure 30: Configuration utilisant un convoyeur

Cette configuration utilise un convoyeur pour déplacer les sous-ensembles d'une station d'assemblage à la suivante. Les pièces de base (récepteurs) arrivent aussi par ce même convoyeur au premier microbox.

Cette fois le déplacement vers le convoyeur ne dépend pas de la largeur du microbox, mais de la distance entre le convoyeur et la machine d'assemblage. Soit c cette distance. En faisant le même raisonnement que dans le paragraphe précédent, il résulte que :

$$T_{tot} = \text{Max} \left(T_{ass}, \frac{T_{chtot} \cdot \text{surfComp}}{\text{surfPal} \cdot r} + \frac{2c + \sqrt{\text{surfPal}} + 2x}{V_{\max}} + 4(T_{acc} + T_{prise} + T_{pose}) \right) \quad (14)$$

Pour pouvoir comparer avec la configuration précédente, la distance entre le convoyeur et le point d'assemblage c est égal à 50 mm ($= \ell/2$ pour l'exemple sans convoyeur).

L'optimum de la surface de la palette n'a pas changé comme le démontre l'équation suivante :

$$\frac{dT_{tot}}{d(\text{surfPal})} = \frac{-\text{surfComp} \cdot T_{chtot}}{r \cdot \text{surfPal}^2} + \frac{1}{2\sqrt{\text{surfPal}} \cdot V_{\max}} = 0 \quad (15)$$

Cette équation résolue par rapport à la surface de la palette donne :

$$\text{surfPal} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot \text{surfComp} \cdot T_{chtot} \cdot V_{\max}}{r}} \quad (16)$$

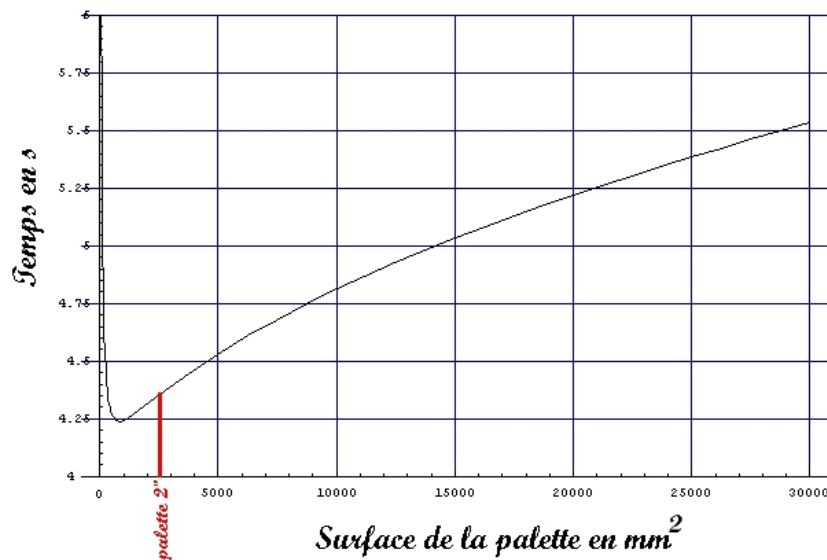


Figure 31: Temps d'assemblage pour une station avec convoyeur

En comparant ces résultats avec ceux du §3.8.1 (configuration sans convoyeur), on observe que la taille optimale de la palette est indépendante de l'utilisation du convoyeur. En effet l'équation (16) est identique à l'équation (11).

Par contre le temps d'assemblage pour une configuration sans convoyeur est (9) :

$$T_{tot} = \text{Max} \left(T_{ass}, \frac{T_{chtot} \cdot \text{surfComp}}{\text{surfPal} \cdot r} + \frac{2\sqrt{\text{SurfMbox}} + \sqrt{\text{surfPal}} + 2x}{V_{\max}} + 5 \cdot (T_{acc} + T_{prise} + T_{pose}) \right) \quad (17)$$

Comparons ce temps à celui nécessaire pour une configuration utilisant un convoyeur (14):

$$T_{tot} = \text{Max} \left(T_{ass}, \frac{T_{chtot} \cdot \text{surfComp}}{\text{surfPal} \cdot r} + \frac{2c + \sqrt{\text{surfPal}} + 2x}{V_{\max}} + 4(T_{acc} + T_{prise} + T_{pose}) \right) \quad (18)$$

Le trajet parcouru par le robot dans le premier cas est : $2\sqrt{SurfMbox} + \sqrt{surfPal} + 2x \Leftrightarrow 2\ell + p + 2x$ en faisant 5 trajets, tandis que dans la 2^{ème} configuration (avec le convoyeur), le robot n'effectue que 4 trajets et la longueur totale parcourue est de $2c + \sqrt{surfPal} + 2x \Leftrightarrow 2c + p + 2x$. Ainsi même si $c = \ell$ dans le deuxième cas, on enregistre un gain de temps, puisque l'opération nécessite que 4 trajets (un temps d'accélération, de prise et de pose en moins).

La configuration avec le convoyeur n'est intéressante que dans le cas où la disposition des appareils est telle que c soit plus petit que ℓ . Dans notre exemple où $c = \ell/2$, le gain de temps est de 1,55 sec pour le cas de la palette de 2" et avec les temps d'accélération, prise et pose considérés.

Donc la configuration avec le convoyeur permettra d'augmenter la cadence s'il peut être placé près de la machine d'assemblage. Mais il faudra compter le coût du convoyeur, du système qui le chargera et du système d'indexage. De plus il faut que cette installation soit compatible avec la salle blanche.

La méthodologie développée permet de prendre en considération ce type de configurations. En effet, dans ce cas le point où le robot prend les sous-ensembles et le point où il les dépose après l'assemblage est le même : C'est un point sur le convoyeur. La pose et la prise des composants au même point sur le convoyeur permettent d'économiser un mouvement du robot. Par contre il faut attendre que le convoyeur déplace les composants jusqu'au robot. Il est aussi possible de configurer différemment le programme pour prendre en compte le cas où le point de prise et le point de pose du composant après l'assemblage n'est pas le même.

Pour adapter ces calculs à un cas réel il faut considérer r comme résultante, comme expliqué dans le paragraphe précédent. Ainsi r est défini par l'équation (13).

3.8.3. Influence des différents paramètres du microbox sur la cadence

Dans ce paragraphe est présentée la façon dont les différents paramètres du microbox, tels que la vitesse du robot ou le temps de chargement de la palette, influencent le temps d'assemblage du produit.

Reprenons la formule (9) à la page 44:

$$T_{tot} = \text{Max} \left(T_{ass} \cdot \frac{T_{chtot} \cdot surfComp}{surfPal \cdot r} + \frac{2\sqrt{SurfMbox} + \sqrt{surfPal} + 2x}{V_{max}} + 5 \cdot (T_{acc} + T_{prise} + T_{pose}) \right) \quad (9)$$

Considérons comme précédemment que le temps d'assemblage est plus petit que le temps de transport et de chargement de la palette.

Il est clair que T_{chtot} influence la taille optimale de la palette. En effet, si ce temps devient plus important, il est plus avantageux d'avoir une plus grande palette (avec plus de composants) pour répartir le temps de chargement sur plusieurs pièces (voir Figure 32). Dans le cas limite où il n'y a pas de palette (les composants arrivent un par un sur un convoyeur par exemple), le temps d'assemblage ne dépend plus de la taille de la palette, mais de la distance que le robot doit parcourir jusqu'au convoyeur (c).

Dans ce cas, le temps d'assemblage global, serait un plan continu et horizontal (car il est indépendant de la surface de la palette). Sa position dépend de l'emplacement du convoyeur par rapport à la place de travail.

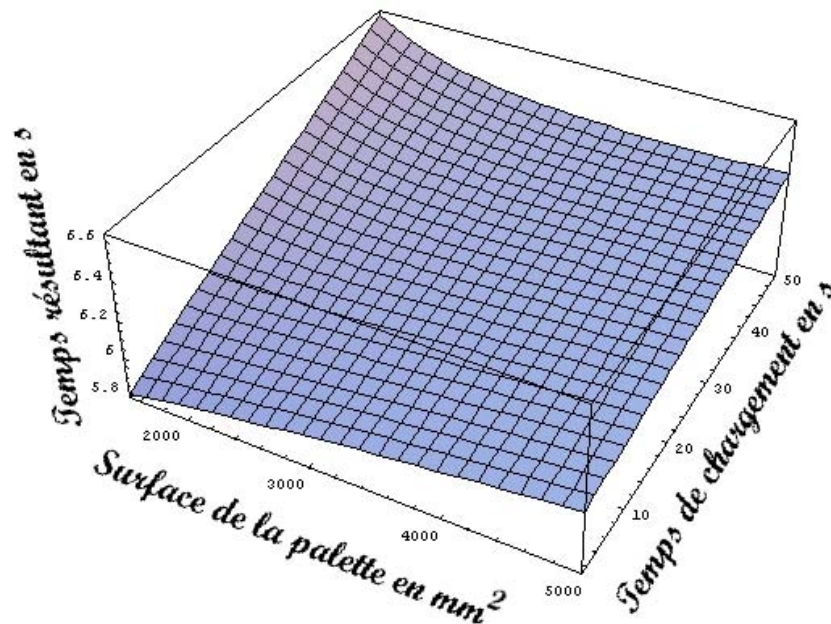


Figure 32: Influence du temps de chargement sur le temps d'assemblage du produit

La taille des composants influence aussi le temps d'assemblage comme le montre la Figure 33. Dans cet exemple le temps de chargement est de 1 sec. On observe que lorsque la taille des composants augmente, il y en a moins par palette et il faut donc des palettes plus grandes pour avoir la même performance qu'avant.

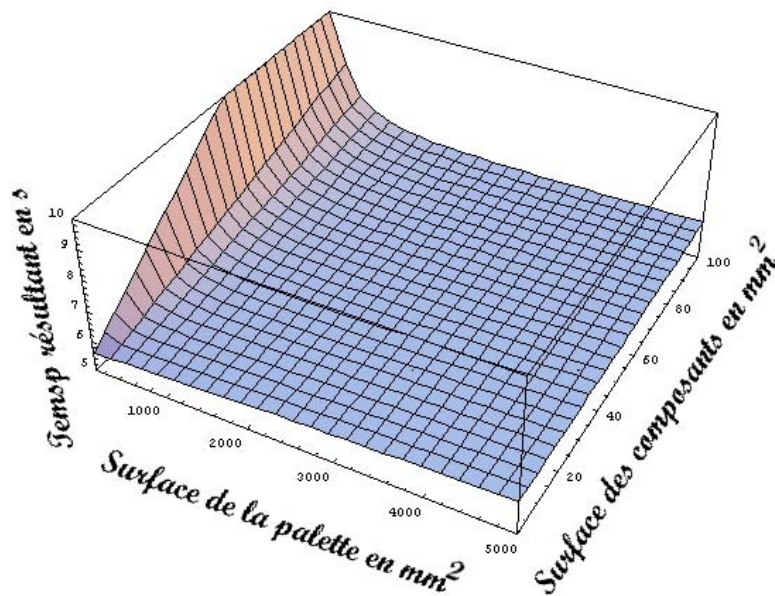


Figure 33: Influence de la taille des composants sur le temps d'assemblage

La Figure 34 montre l'influence de la vitesse maximale du robot sur le temps d'assemblage. Si le robot est rapide, le temps d'assemblage diminue de façon générale, en revanche le temps de chargement des palettes devient plus important.

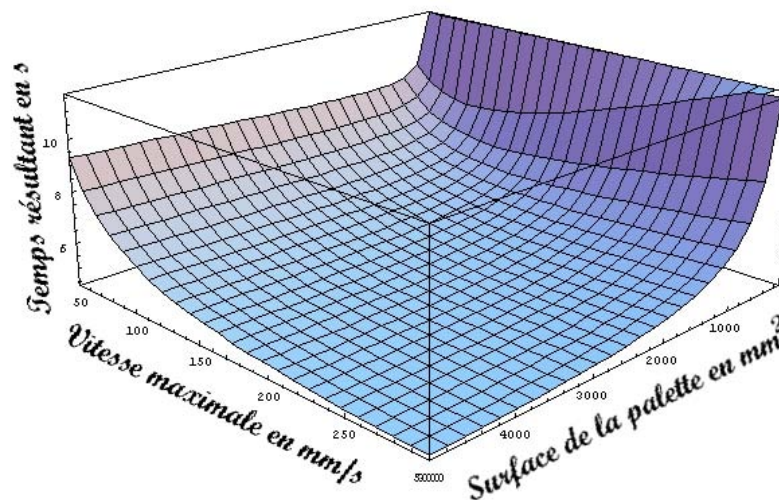


Figure 34: Influence de la vitesse maximale du robot sur le temps d'assemblage

C'est pour cette raison que l'optimum pour la taille des palettes est légèrement plus grand quand le robot est plus rapide.

La taille du microbox (surfMbox) de même que les valeurs T_{acc} , T_{ass} , T_{prise} et T_{pose} interviennent dans l'équation (9) comme des constantes. De ce fait nous pouvons conclure qu'une variation de ces valeurs ne fait que déplacer verticalement tout le graphe, c'est-à-dire augmenter le temps total. La Figure 35 illustre l'influence de la variation de la taille du microbox.

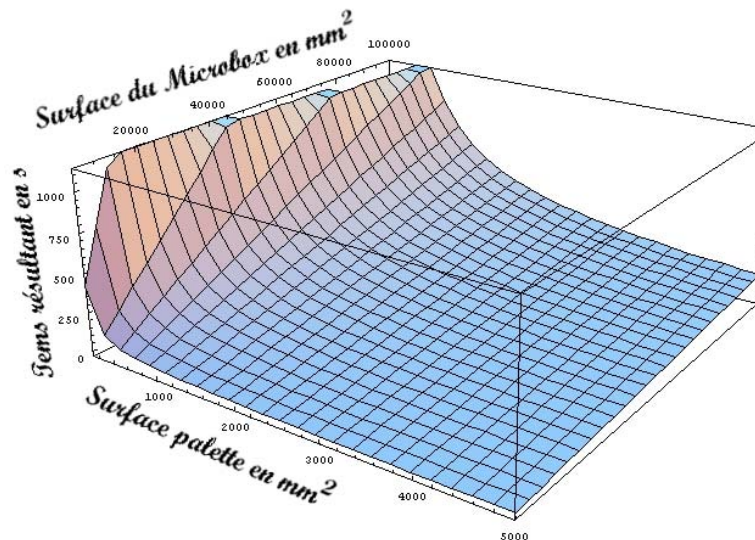


Figure 35: Influence de la taille du microbox sur le temps d'assemblage

La cadence de production d'un produit a un optimum pour chaque cas considéré. Cet optimum dépend de plusieurs facteurs, qui sont :

- La rapidité du robot
- La taille du composant (la cadence est plus importante pour des petits composants)

- Le temps de chargement des palettes (La cadence augmente quand il devient plus court). Une solution alternative est l'utilisation d'un convoyeur à condition qu'il puisse passer assez près de la zone de travail et qu'il soit compatible avec l'environnement de travail (propreté, humidité, etc.)
- La taille du microbox. Un petit microbox permet d'augmenter la cadence.

La taille du microbox est liée à la taille des machines qu'elle contient et à la dimension de la palette. Plus la palette est petite, plus le microbox peut devenir petit et permettre d'augmenter ainsi la cadence. Mais une petite palette implique un chargement plus fréquent des palettes, ce qui augmente le temps de chargement. Pour répartir le temps de chargement sur plusieurs pièces, il faut augmenter le nombre des composants par palette et donc augmenter la taille des palettes, ce qui contredit l'hypothèse de départ (avoir des petites palettes)... Cela démontre l'importance d'avoir une démarche systématique pour déterminer l'optimum.

3.9. Méthodologie pour la détermination du coût optimal du produit

L'optimisation du temps de la production par microbox a été présentée au §3.8 . Dans ce paragraphe, nous analysons le deuxième critère pour l'optimisation de la Microfactory: le coût.

Les principaux facteurs liés à ce critère sont le coût des machines ou robots qu'il faut utiliser et le volume de production envisagée. Une grande production nécessite des machines plus grandes, plus rapides et donc plus chères. En revanche, le nombre des pièces fabriquées ou assemblées étant grand, le coût par pièce est plus faible que pour une petite série. Comme pour les critères de la cadence, il y a deux facteurs qui agissent en sens opposé et dont il s'agit de trouver l'optimum pour chaque produit.

Pour fixer chaque composant dans le sous-ensemble, un certain nombre d'opérations est nécessaire. Le coût généré par chaque composant est calculé en comptant sur un amortissement des machines et/ou des robots sur une année, ou sur leur durée de vie si la fréquence d'utilisation est telle qu'elle ne dépasse pas cette durée. A cela il faut ajouter le coût d'exploitation et de maintenance des machines plus les coûts des opérations logistiques manuelles (chargement manuel de la palette) [42].

Le coût d'assemblage du produit est la somme des coûts attribués pour l'assemblage de chaque composant.

Ainsi nous avons :

$$Coût_p = \sum_i^{Composants} \left(\left(\frac{Coût_{machine_i}}{T_{fonctionnement / année_i}} + Coût_{exploitation_i} \right) \cdot T_{tot_i} + \frac{T_{oper} \cdot Sal / s}{N_p} \right) \quad (19)$$

Où :

Coût_p = coût d'assemblage du produit [CHF].

Coût_{machine i} = le coût des machines ou robots. Il s'agit de toutes les machines qui font les opérations nécessaires pour assembler le composant **i** [CHF].

Coût_{exploitation i} = les frais d'exploitation et de maintenance des machines ou robots. Il s'agit de toutes les machines ou robots qui font les opérations nécessaires pour assembler le composant **i** [CHF].

$T_{\text{fonctionnement/année } i}$	= Temps de fonctionnement de la machine _i durant une année [s]
$T_{\text{tot } i}$	= Temps nécessaire pour réaliser les opérations d'assemblage du composant i [s].
T_{oper}	= Temps nécessaire à l'opérateur pour charger la palette [s].
Sal/s	= Salaire de l'opérateur par seconde [CHF].
N_p	= Nombre des composants que contient une palette.

Le temps d'assemblage d'une opération est exprimé par l'équation 5 (voir p. 41) :

$$T_{\text{tot}} = \text{Max} \left(\text{Max}_n(T_a, T_m, T_c), T_{\text{trtot}} + \frac{T_{\text{chtot}}}{N_p} \right) \quad (5)$$

En introduisant (5) dans (19) on obtient :

$$\text{Cout}_p = \sum_i^{\text{Comp}} \left(\left(\frac{\text{Coût}_{\text{machine}_i}}{T_{\text{fonctionnement / année}_i}} + \text{Coût}_{\text{exploitation}_i} \right) \cdot \text{Max} \left(\text{Max}_n(T_a, T_m, T_c), T_{\text{trtot}} + \frac{T_{\text{chtot}}}{N_p} \right) + \frac{T_{\text{oper}} \cdot \text{Sal/s}}{N_p} \right) \quad (20)$$

Donc le coût est proportionnel au temps d'assemblage. Malheureusement il n'est pas possible d'avoir une représentation graphique sur laquelle on aurait pu voir clairement l'optimum, car le prix d'une machine n'est pas déterminé par une fonction quelconque. Le prix d'une machine est lié à sa précision et à sa taille, mais aussi aux degrés de liberté qu'elle possède et à la complexité de l'opération à laquelle elle est destinée.

Ainsi pour chaque produit et chaque combinaison de machines capables d'effectuer les tâches nécessaires pour l'assemblage, il faut calculer le coût des opérations d'assemblage du produit de cas en cas.

3.10. Comparaison des scénarios et vérification de leur compatibilité

A ce stade de la méthodologie toutes les combinaisons valables pour chaque opération du produit sont établies. Pour chaque combinaison le temps d'autonomie, le coût et la cadence sont estimés.

La démarche informatisée de cette méthodologie permet de présenter à l'utilisateur les meilleures solutions selon le temps de production, respectivement le coût pour chaque microbox.

Il incombe à l'utilisateur de décider quelle configuration il préfère pour l'assemblage de chaque composant. Son choix pourra s'effectuer selon sa préférence pour la rapidité, l'économie ou autre.

Le programme compare les solutions choisies par l'utilisateur et examine leur compatibilité en terme de production. Si par exemple la cadence de production d'un des microboxes est la moitié de toutes les autres, le programme proposera de doubler cette station dans le but d'avoir la même cadence pour toutes les microboxes. Dans ce cas encore l'utilisateur est libre du choix de cette solution.

3.11. Configuration finale de la microfactory

La dernière partie de la méthodologie permet de faire un résumé de tous les facteurs importants de la microfactory. La démarche informatisée permet d'avoir les résultats de la méthodologie sous forme de rapport. Ce rapport contient les caractéristiques du produit, classées par composant à assembler. Pour chaque composant les caractéristiques de la configuration retenue sont données. Il s'agit plus spécifiquement des caractéristiques (dimensions, précision, prix, etc.) de toutes les machines, robots et palettes utilisés pour réaliser l'assemblage du composant. Il est aussi mentionné combien de fois chaque microbox est intégré dans la chaîne de production de la microfactory (s'il est dédoublé), et sa cadence.

Finalement, on a procédé à l'estimation de l'encombrement de toute la microfactory avec tous ces microboxes et du coût total de toute la chaîne de production. Ainsi l'utilisateur sait quelle est la meilleure configuration pour le montage de chaque composant.

3.12. Conclusions de la méthodologie de conception de la microfactory

En conclusion le temps total pour un assemblage est donné par la formule 5 (voir p. 41) :

$$T_{tot} = \text{Max} \left(\text{Max}_n(T_a, T_m, T_c), \sum_i^d \left(\frac{\text{dist}_i}{V_{\max}} + T_{acc} + T_{prise} + T_{pose} \right) + \frac{T_{chtot}}{N_p} \right) \quad (5)$$

Où dist_i est la distance parcourue par le robot durant le i -ième déplacement.

Ce temps dépend du temps d'assemblage, du temps de chargement de la palette, des caractéristiques du robot et de la taille de la palette. Comme cette opération dépend du temps le plus long, il n'est pas possible mathématiquement de trouver l'optimum sans avoir au préalable effectué le calcul de tous les cas possibles, d'où l'intérêt d'utiliser une simulation pour trouver la meilleure solution.

Comme le coût de l'assemblage de chaque production dépend de la cadence, là aussi il n'est pas possible de trouver l'optimum mathématiquement pour le cas général.

$$\text{Cout}_p = \sum_i^{\text{Comp}} \left(\left(\frac{\text{Coût}_{\text{machine}_i}}{T_{\text{fonctionnement}} / \text{année}_i} + \text{Coût}_{\text{exploitation}_i} \right) \cdot \text{Max} \left(\text{Max}_n(T_a, T_m, T_c), T_{\text{rtot}} + \frac{T_{\text{chtot}}}{N_p} \right) + \frac{T_{\text{oper}} \cdot \text{Sal}/s}{N_p} \right) \quad (21)$$

Pour obtenir la plus grande cadence, il faut disposer d'un système de chargement des palettes et d'un robot de transfert le plus rapide possible. Ensuite, avec ces données, la méthodologie permettra de choisir la taille de la palette la mieux adaptée à chaque composant, en fonction de ses dimensions. La gamme des opérations définit les machines nécessaires pour l'assemblage ainsi que le robot nécessaire pour faire les déplacements des composants et sous ensembles.

Finalement, la taille du microbox va être choisie comme une résultante (mais la plus petite possible) en fonction des paramètres mentionnés au dessus (taille du composant et de la palette, caractéristiques du robot et machines nécessaires pour l'assemblage). Dans l'estimation de la surface du microbox il ne faut pas oublier de compter deux fois la surface de la palette. Effectivement, en vertu de l'explication donnée au §5.1.2, (p. 86), il faut aussi tenir compte de la place nécessaire pour poser le couvercle de la palette.

L'emplacement des machines et de la palette seront les plus rapprochés possibles pour minimiser les courses du robot et augmenter ainsi la cadence.

Quant à la solution avec convoyeur (pour transférer les pièces entre les microboxes), son efficacité dépendra du trajet que le robot sera obligé de faire et de la possibilité de rendre un tel système compatible avec une salle blanche. La méthodologie présentée permet également de prendre ce cas en considération.

Optimiser le temps de production n'est pas le seul critère pour la microfactory. Il faut considérer le coût d'investissement, de production, de maintenance et des opérateurs pour le chargement des palettes d'un tel système. La base de données, décrite au §3.5, contient les informations nécessaires pour estimer ce coût de l'installation.

La méthodologie basée sur une configuration modulaire présente l'avantage de pouvoir s'adapter facilement à une nouvelle variante du produit. En cas de panne d'un module, il est également possible de le remplacer par un module de réserve et continuer ainsi la production pendant le temps de réparation du module en question.

Un exemple avec une application industrielle est expliqué en annexe (section A1).

Chapitre 4. Conception d'environnements propres miniaturisés

La méthodologie développée dans le chapitre précédent montre que selon de la taille des composants à assembler, il peut être avantageux d'avoir une chaîne de production miniature. Si la nature des composants nécessite un environnement propre, la miniaturisation apportera une diminution de l'investissement nécessaire par rapport au coût d'une installation dans une grande salle blanche. De plus les frais d'exploitation seront moindres, si le volume à maintenir propre est plus petit.

La question qui subsiste est de savoir comment fabriquer une salle blanche miniaturisée. Le but principal de ce chapitre est donc de démontrer la faisabilité d'un environnement propre, miniature et autonome par rapport à une grande salle blanche.

Dans les salles blanches la propreté est garantie grâce à un flux d'air. Ce flux exerce une force de traînée sur les microparticules qui s'y trouvent et celles qui sont générées durant le processus et les repousse vers l'extérieur. Cette force décolle aussi les particules accrochées dues aux forces de surfaces (Van der Waals, capillarité, forces électrostatiques, etc.).

Notre prototype aura un flux laminaire et une vitesse moyenne de l'air variant entre 0,4 et 0,5 m/s, comme dans les salles blanches standard. Ce flux laminaire permet de garantir le sens de déplacement des particules qui sont générées durant les opérations. La petite taille de notre prototype (microbox) qui permet d'avoir un temps de mise en service court comme on verra par la suite, remet en question la nécessité du flux laminaire ou encore la nécessité d'un flux continu. Cependant au cadre de cette thèse nous allons nous limiter à la démonstration de la faisabilité d'un flux laminaire et continu dans le volume de travail. La vitesse du flux sera celle que les normes des salles blanches imposent, c'est à dire 0,4 à 0,5 m/s.

L'état de l'art et la classification des filtres ont été discutés au §2.4. Ce chapitre commence par la description des caractéristiques des filtres. La problématique du flux laminaire est abordée par la suite. La dernière partie de ce chapitre expose les simulations, les expériences et les mesures effectuées pour prouver l'efficacité de notre minienvironnement.

4.1. Caractéristiques des filtres

Analysons les caractéristiques des filtres et plus particulièrement celles d'un filtre HEPA, comme il est représenté sur la Figure 36. Ce sont ces filtres qui sont couramment utilisés pour filtrer l'air des salles blanches. Les plis de ce filtre permettent d'avoir une surface effective (A) plus grande que la section de la conduite de l'air.

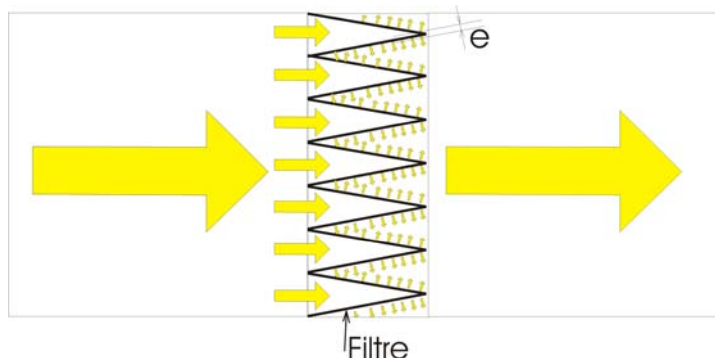


Figure 36: Représentation d'un filtre HEPA

Tous les filtres sont caractérisés par la loi de Darcy [43] :

$$\text{où: } \frac{Q_m}{A} = \frac{k \cdot \Delta P}{e \cdot \gamma} \Rightarrow Q_m = \frac{k \cdot A \cdot \Delta P}{e \cdot \gamma} \quad (22)$$

Q_m est le débit en m³/s

A est la surface effective du filtre en m²

ΔP est la perte de pression causée par le filtre en Pa

κ est la conductivité du filtre en m/s

e est l'épaisseur effective du filtre en m

γ est le poids spécifique de l'air en N/m³

La valeur $Z = \frac{e \cdot \gamma}{k \cdot A}$ est nommée impédance du filtre et la loi de Darcy devient $Q_m = \frac{\Delta P}{Z}$. Nous remarquons sa similitude avec la loi d'Ohm.

Nous constatons que la résistance présentée au flux d'air par le filtre est proportionnelle à l'épaisseur du filtre et inversement proportionnelle à la surface effective de ce dernier. Les besoins de filtration étant connus (filtrer les particules de taille supérieure à une certaine dimension), k est fixe. Pour diminuer la résistance d'un filtre, nous pouvons diminuer son épaisseur effective, mais au-delà d'une certaine valeur la qualité de filtration diminue.

L'autre solution est d'augmenter la surface du filtre au détriment de l'encombrement. Pour éluder ce problème, les fabricants de filtres (filtres HEPA, ULPA, etc.) font des plis comme le montre la Figure 36. Ainsi la surface effective du filtre est plus grande que la section de la conduite, mais l'encombrement en profondeur augmente proportionnellement à l'augmentation de la surface effective.

La vitesse de l'air dans une salle blanche varie en fonction de la classe de propreté visée. Plus la propreté est élevée, plus la vitesse de l'air est grande [44]. Cette vitesse est cependant limitée car les grandes vitesses augmentent le nombre de Reynolds ce qui implique un flux d'air turbulent. De plus un flux d'air à grande vitesse crée un sentiment d'inconfort auprès du personnel et nécessite une installation plus coûteuse.

Rappelons que le chiffre de la classe de propreté indique le nombre de microparticules par pied cube d'air. Donc, plus un environnement est propre, plus le chiffre de la classe de propreté est petit. Par exemple, une salle de classe 1 est plus propre qu'une salle de classe 1000.

La vitesse de l'air nécessaire pour garantir la propreté dépend aussi de l'environnement de travail, c'est-à-dire de la présence ou non d'autres facteurs qui risquent de générer des microparticules. Dans une salle blanche où le risque de génération des particules est grand, en raison de la présence de personnes ou d'appareils qui risquent de polluer, la vitesse de l'air doit être plus grande.

Selon [45] il est possible d'avoir un flux d'air moins important tout en garantissant une classe de propreté demandée, suivant la configuration de la salle blanche ; la propreté de la salle est constamment mesurée et la vitesse de l'air est régulée en conséquence. Cela permet d'avoir un taux de renouvellement de l'air moindre et d'économiser l'énergie de ventilation.

Le but principal de ce projet est de démontrer la faisabilité d'une salle blanche miniature qui remplit les critères suivants :

- Faible coût
- Indépendance d'une salle blanche
- Modulaire (chaque partie doit être autonome des autres)
- Petit volume de travail (1dm^3) et faible encombrement
- Classe de propreté 100 ou meilleure selon les besoins

Déterminons maintenant les besoins pour un tel module.

La norme ISO 14644 indique que pour arriver à une classe de propreté de 100 il faut générer une vitesse de l'air filtré entre 0,3 et 0,6 m/s [6]. Admettons pour notre application une vitesse de 0,5 m/s. La section du flux d'air dans la place de travail est de l'ordre de 1 dm^2 . Ce qui conduit à un débit d'air de $18\text{ m}^3/\text{h}$.

La surpression nécessaire pour que l'air traverse un filtre HEPA varie entre 60 Pa et 160 Pa selon la durée du temps d'utilisation. A cette pression il faut encore ajouter 50 Pa pour la perte de pression due au laminateur, plus 50 Pa pour les pertes dans les conduits. Au total il faut une surpression de 160-250 Pa. Ces différences de pression se réfèrent au plus petit filtre HEPA qui existe à notre connaissance et qui a une section de 150 mm x 150 mm avec une épaisseur de 70 mm.

Examinons maintenant les possibilités qui existent en utilisant un ventilateur (axial ou radial) pour générer cette surpression :

Le ventilateur axial le plus petit trouvé pour cette application mesure 80 mm x 80 mm x 38 mm et peut générer une surpression jusqu'à 130Pa mais pour un débit de 60-100 m^3/h (DC-Axiallüfter Série 8200J, EbmPapst).

Le ventilateur radial le plus petit trouvé pour cette application mesure 97 mm x 93,5 mm x 33 mm et peut générer une surpression allant de 10-300Pa pour un débit de 20 m^3/h (DC-Radiallüfter Série RL-65, EbmPapst).

L'encombrement de ces ventilateurs pour créer la surpression nécessaire, plus les filtres serait plus important que notre mini salle blanche. Cette solution est donc incompatible avec le but que nous nous sommes fixé : la réalisation d'une salle blanche qui occupe un espace aussi réduit que possible.

Une autre solution est d'utiliser de l'air comprimé livré dans des bonbonnes de gaz. Il serait même envisageable d'utiliser de l'azote pur et comprimé en bouteilles. Si nous voulions utiliser des bouteilles de 50 litres, (contenant 10 m^3 d'azote à la pression atmosphérique), cela nécessiterait deux bouteilles par heure. A moins de disposer d'un réseau d'azote, cette solution n'est pas économique ni pratique pour notre application.

Une autre solution encore est d'utiliser l'air comprimé en réseau souvent installé dans les usines. La pression standard est de 6 bars.

L'utilisation de cet air comprimé n'engendre pas de coûts supplémentaires considérables. Pour ce faire, il faut d'abord filtrer les gouttelettes d'huile qui se trouvent souvent dans l'air comprimé, puis les microparticules qui s'y trouvent aussi. Pour les gouttelettes d'huile, on utilisera des pré-filtres suivis de filtres principaux pour retenir les microparticules. Les pré-filtres protègent aussi les filtres principaux, augmentant ainsi leur durée de vie.

Les filtres pour gaz à haute pureté ou ceux pour l'air comprimé utilisés dans les salles blanches, conviennent comme filtres principaux pour notre application. Les premiers filtres sont très compacts (par exemple : $\varnothing 77$ mm x 154 mm pour le filtre Ultramet-L 6600 Series Filter Assembly de Pall Microelectronics), tandis que les seconds sont plus volumineux (par exemple : $\varnothing 70$ mm x 168 mm pour le filtre submicronique AFD40-F03 de SMC), mais très bon marché. C'est la deuxième solution que nous avons retenue pour ce projet.

Ces filtres seront utilisés pour filtrer l'air de plusieurs modules de la Microfactory. Ainsi, ils peuvent être intégrés dans l'installation d'air comprimé de l'entreprise, juste avant la Microfactory. Ainsi ils n'encombrent pas directement les abords de la microfactory.

Plus précisément pour notre application nous avons utilisé les filtres suivants de la maison SMC :

- Le filtre AW40F03 : Il est utilisé pour filtrer les microgouttelettes d'huile. Il filtre les particules plus grandes que $5\text{ }\mu\text{m}$.
- Le filtre micronique AFM40- F03 : Son efficacité de filtration est de 95% pour des particules de $0,3\text{ }\mu\text{m}$.
- Le filtre submicronique AFD40-F03 : Son efficacité de filtration est de 95% pour des particules de $0,01\text{ }\mu\text{m}$.



Figure 37: Le filtre submicronique AFD40-F03 de la maison SMC

Les mesures de propreté effectuées dans le microbox confirment que ces filtres assurent la propreté souhaitée (voir §4.6).

4.2. Flux laminaire

L'air propre dans les salles blanches est laminaire comme expliqué au §2.1.1.

Un flux d'air laminaire entraîne les microparticules qui sont générées durant le procédé ou celles qui se trouvent aux alentours de la zone propre, loin de la place de travail. Si le flux est turbulent, les microparticules entraînées par les tourbillons peuvent se déplacer localement vers une direction opposée à la direction générale du flux.

Dans notre application l'air est pré-filtré et arrive avec une pression qui peut varier entre 0,2 et 0,6 bar. Cet air sort par un tuyau de 8 mm de diamètre interne et nous désirons le transformer en un flux laminaire sur une section de 65 mm x 95 mm. Ce changement de section important va créer des sensibles variations des vitesses et des tourbillons. Il est donc nécessaire d'utiliser un dispositif pour homogénéiser le flux sur une longueur minimale. Ce dispositif est appelé homogénéisateur.

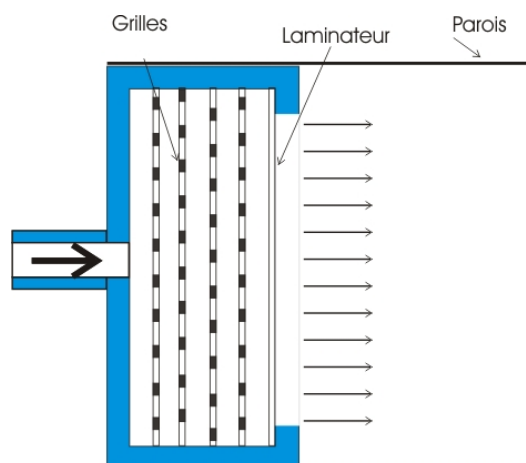


Figure 38 : Représentation de l'homogénéisateur

Il est constitué par une boîte en aluminium : L'air comprimé pré-filtré entre par une face et sort par la face opposée dans l'espace de travail du Microbox. À l'intérieur de l'homogénéisateur plusieurs grilles sont intercalées. À la suite des grilles un lamineur a été placé. Il s'agit d'un tissu spécial avec des mailles très fines. Il provoque une faible chute de pression (50 Pa) et en combinaison avec les grilles il homogénéise le flux de l'air.

Le lamineur est utilisé dans les salles blanches conventionnelles juste après les filtres HEPA pour homogénéiser le flux, car comme le montre la Figure 36 ces filtres sont constitués de plusieurs plis qui déstabilisent le flux.

Dans les paragraphes qui suivent nous expliquons la modélisation et les calculs effectués (§4.3), les mesures de laminarité du flux, de la cartographie des vitesses de l'air à la sortie de l'homogénéisateur et de la propreté du microbox (§4.4).

4.3. Modélisations et calculs

4.3.1. Introduction

La théorie de la mécanique des fluides nous permet de prédire si un flux sera laminaire ou pas. Un des premiers critères est le nombre de Reynolds [46]. Le calcul de ce nombre donne une première estimation du type de flux pour une certaine vitesse de l'air.

L'analyse du §4.3.2 démontre que pour un si petit environnement de travail et pour les vitesses recherchées, le flux reste laminaire. Néanmoins le frottement de l'air sur les parois crée une couche limite dans laquelle il y a des tourbillons. Il est démontré par la suite que cette couche n'excède pas 2 mm dans le microbox.

À la suite, des calculs par éléments finis permettent de simuler le flux pour représenter l'écoulement.

4.3.2. Le nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds (**Re**) permet d'avoir un premier aperçu du flux. Ce nombre adimensionnel peut prédire la laminarité ou pas d'un flux. Effectivement :

si **Re** < 2200 le flux est laminaire

si **Re** > 3000 le flux est turbulent

si $2200 < \mathbf{Re} < 3000$ l'écoulement est laminaire ou turbulent selon la forme de la conduite et les obstacles qui s'opposent au flux.

Le nombre de Reynolds est défini par la formule :

$$Re = \frac{D_H \cdot w_o}{\nu} \quad (23)$$

Où :

D_H est le diamètre hydraulique. Si la section est cylindrique, il est égal au diamètre, mais si la section est rectangulaire ($a \times b$), il devient

$$D_H = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} \quad (24)$$

w_o est la vitesse de l'écoulement initial [m/s]

ν est le coefficient de viscosité cinématique [m²/s]; $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ (25)

avec

η le coefficient de viscosité dynamique [Pa s]

ρ la masse volumique du fluide en écoulement [kg /m³] ;

En réécrivant (23) à l'aide de (24) et (25) nous obtenons :

$$Re = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot w_o \cdot \rho}{(a + b) \cdot \eta} \quad (26)$$

Ainsi, le nombre de Reynolds dépend de la section de la conduite, de la vitesse, de la nature du fluide. La température influence indirectement le nombre de Reynolds car elle fait varier le ρ et η .

Le nombre de Reynolds est calculé pour différents gaz dans une conduite rectangulaire de 0,1 m x 0,1 m. Ces calculs sont représentés à la Figure 39. La table ci-après montre les caractéristiques de ces gaz à 20°C et 1bar de pression [47] et [48].

Gaz	Air	Azote	Argon	CO ₂	Hélium	Hydrogène	Néon	Oxygène
ρ [Kg/m ³]	1,161	1,123	1,6024	1,815	0,166	0,0823	0,836	1,2837
η [10 ⁻⁵ Pa s]	1,846	1,782	2,271	1,472	1,98	0,886	3,133	2,072

Tableau 4 : Les propriétés hydrauliques de certains gaz

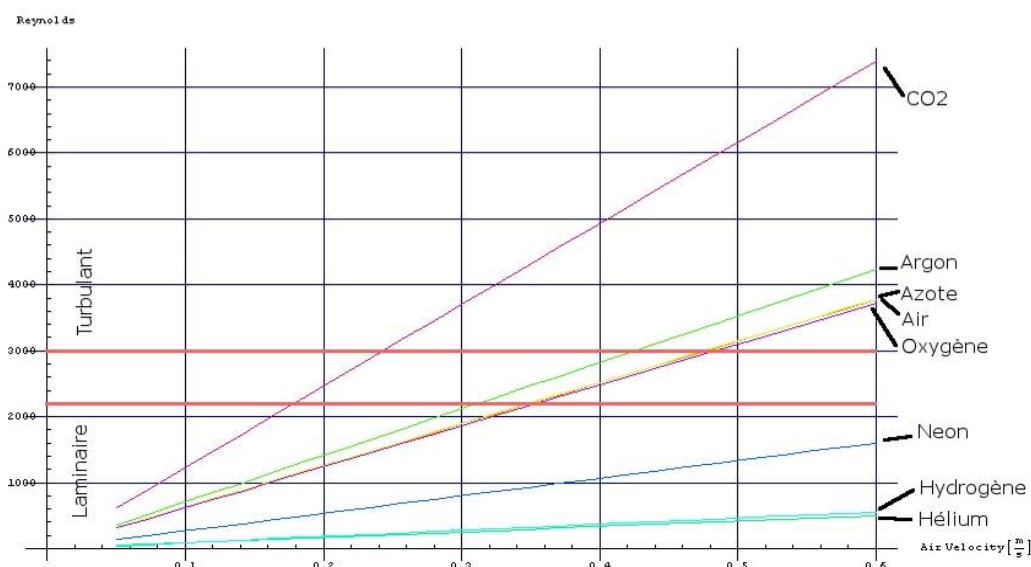


Figure 39: Nombre de Reynolds pour différents gaz dans une conduite carrée de 100mm x 100mm en fonction de la vitesse

Nous pouvons constater que le flux d'air est purement laminaire pour des vitesses inférieures à 0,35 m/s. Au-dessus de cette valeur et jusqu'à la vitesse de 0,48 m/s, nous nous trouvons dans la zone incertaine où, s'il n'y a pas d'amorçage de turbulence, le flux peut rester laminaire. Au-dessus de cette vitesse le flux est turbulent.

L'utilisation du néon ou de l'hydrogène permettrait d'avoir un flux laminaire pour toutes ces vitesses, mais le néon est cher et l'hydrogène très explosif, donc leur utilisation est déconseillée.

La taille de la section de la conduite joue un rôle très important. Quand la section diminue, le nombre de Reynolds le fait aussi, permettant d'atteindre des vitesses plus grandes sans pour autant avoir un régime turbulent.

La section de la Pocket Factory réalisée est de 100 mm x 70 mm. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 40, l'écoulement de l'air se fait en régime laminaire jusqu'à la vitesse de 0,43 m/s et sous certaines conditions il peut y rester jusqu'à la vitesse de 0,59 m/s.

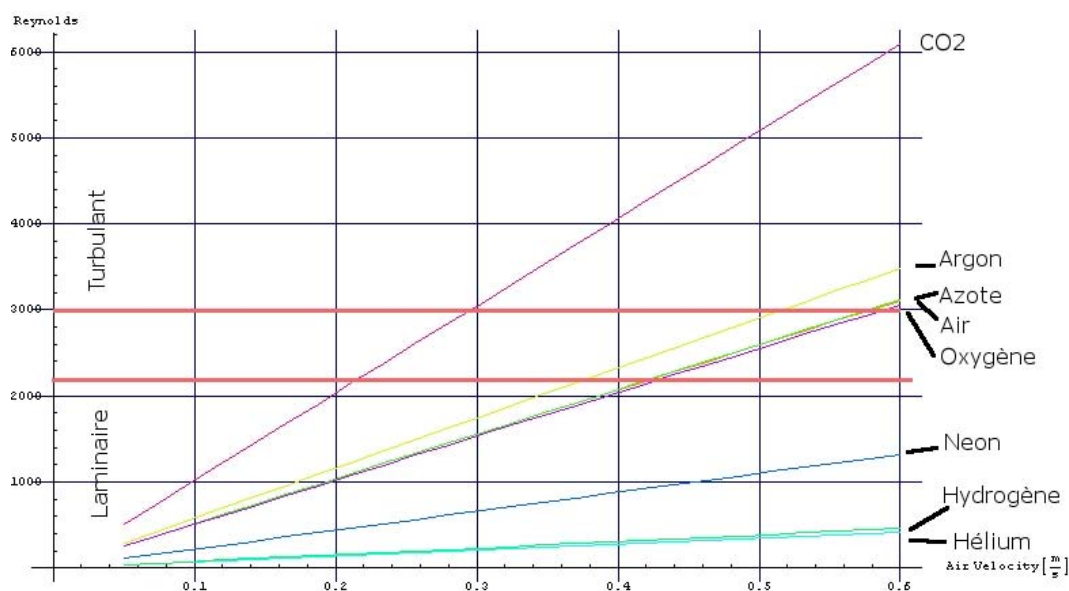


Figure 40: Nombre de Reynolds pour différents gaz dans une conduite de section 100mm x 70mm en fonction de la vitesse. La section est identique à celle du microbox

Comme expliqué précédemment, la diminution de la section de la conduite favorise le maintien du régime laminaire. A titre d'exemple nous avons calculé le comportement du régime pour une section de 70 mm x 70 mm. Dans la Figure 41 nous pouvons observer que la limite du flux laminaire pour l'air est repoussée encore plus loin. Donc avec une vitesse de 0,5 m/s nous restons encore dans le domaine laminaire.

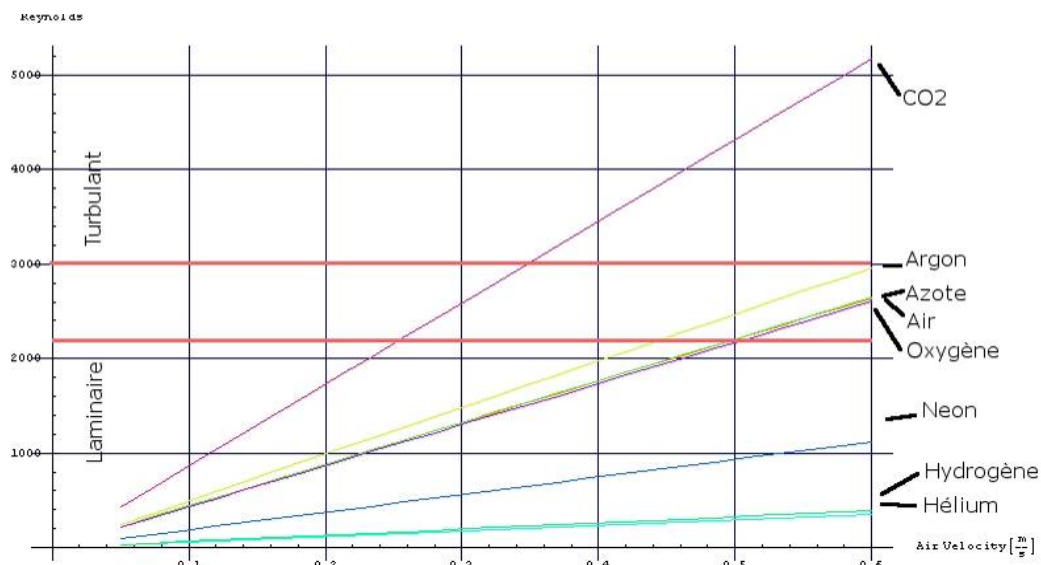


Figure 41: Nombre de Reynolds pour différents gaz dans une conduite de section 70mm x 70mm en fonction de la vitesse

Ces premiers calculs indiquent que du point de vue fluide, il est intéressant d'avoir une chambre aussi petite que possible. Dans les grandes salles blanches la laminarité est possible, car des FFU (Fan Filter Units) sont munis de parois et ils se comportent comme des petites unités du point de vue fluide. De ce fait, il ne faut pas prendre en compte la surface de la salle comme section du flux, mais plutôt la section de chaque FFU.

Dans le voisinage immédiat des parois solides se trouve une couche de transition dans laquelle la vitesse du courant est diminuée par le frottement contre la paroi. Cette *couche de frottement* ou *couche limite* peut être à écoulement laminaire ou turbulent. Au contact de la paroi la vitesse est nulle [43].

L'épaisseur de cette couche limite est donnée par l'expression suivante :

$$d = \sqrt{\frac{\eta \cdot x}{\rho \cdot w}} \quad (27)$$

Où :

η est le coefficient de viscosité dynamique [Pa s]

ρ est la masse volumique du fluide en écoulement [kg /m³] ;

w est la vitesse du fluide [m/s]

x est la distance à laquelle est mesuré la couche limite par rapport au début de l'écoulement [m]

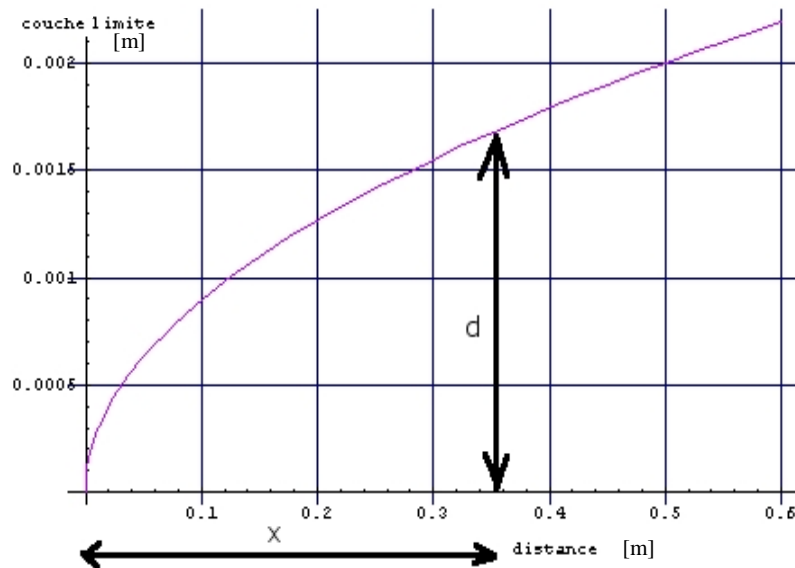


Figure 42: Représentation de l'épaisseur de la couche limite (d) en fonction de la distance du début de l'écoulement (x)

A la suite nous montrons deux graphes pour la couche limite à l'intérieur du microbox pour des vitesses de 0,4 m/s et 0,5 m/s. Nous constatons que dans les deux cas la couche limite pour l'air ambiant ne dépasse pas les 5 mm à une distance de 600 mm de la sortie du laminateur. Donc cette couche limite est négligeable pour notre application.

La couche limite augmente lorsque la vitesse diminue. Dans les figures 42 et 43 nous pouvons voir la valeur de la couche limite pour les autres gaz dont les propriétés sont montrées au Tableau 4.

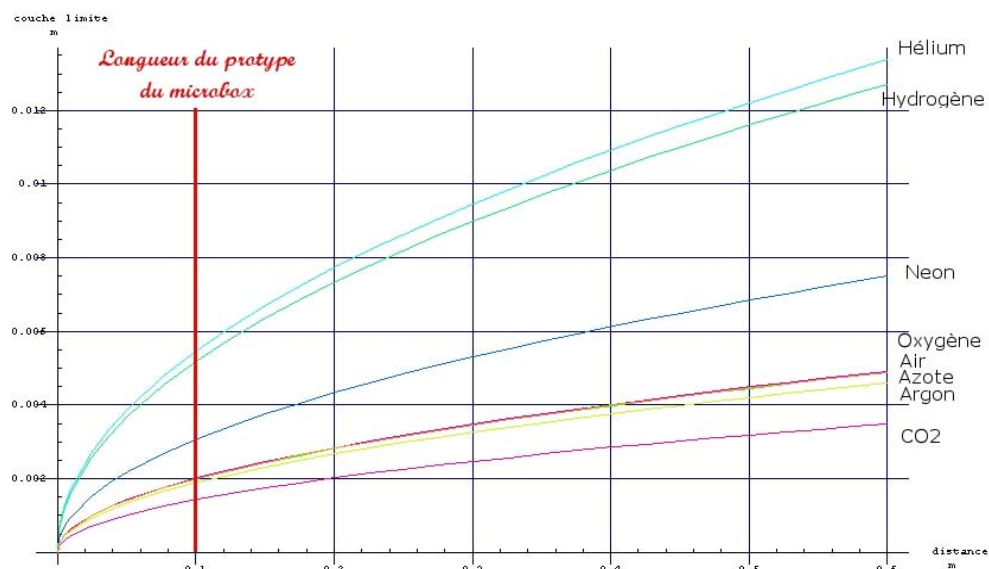


Figure 43: Couche limite pour différents gaz en fonction de la distance pour une vitesse de 0,4m/s

Ces calculs montrent que le phénomène de la couche limite est négligeable pour notre application, vu que la plage de travail se trouve toujours à moins de 100 mm de la sortie du laminateur. Néanmoins, dans le concept général, toutes les opérations sensibles sont réalisées le plus près possible du laminateur. De cette manière le risque de contamination est plus faible et la couche limite la plus petite possible.

4.3.3. Simulations du flux

Les simulations de l'air à travers l'homogénéisateur ont été réalisées à l'aide du logiciel Fluent® 2D. Initialement il était prévu de représenter les grilles telles qu'elles sont en réalité. Malheureusement ceci demandait des grandes ressources informatiques dont nous ne disposons pas. Ainsi, un compromis a été adopté : au lieu de représenter tous les détails de la grille, nous avons admis que la grille est un milieu poreux qui provoque une perte de charge dans notre homogénéisateur. Ceci diminue l'exactitude des résultats, mais permet néanmoins d'avoir une vue globale.

Il y a toujours un danger à utiliser ces simulations, si elles ne sont pas comparées à des résultats expérimentaux. En effet les programmes de simulation utilisent différents modèles selon qu'il s'agit de simuler un flux laminaire ou turbulent. Ainsi, les résultats de

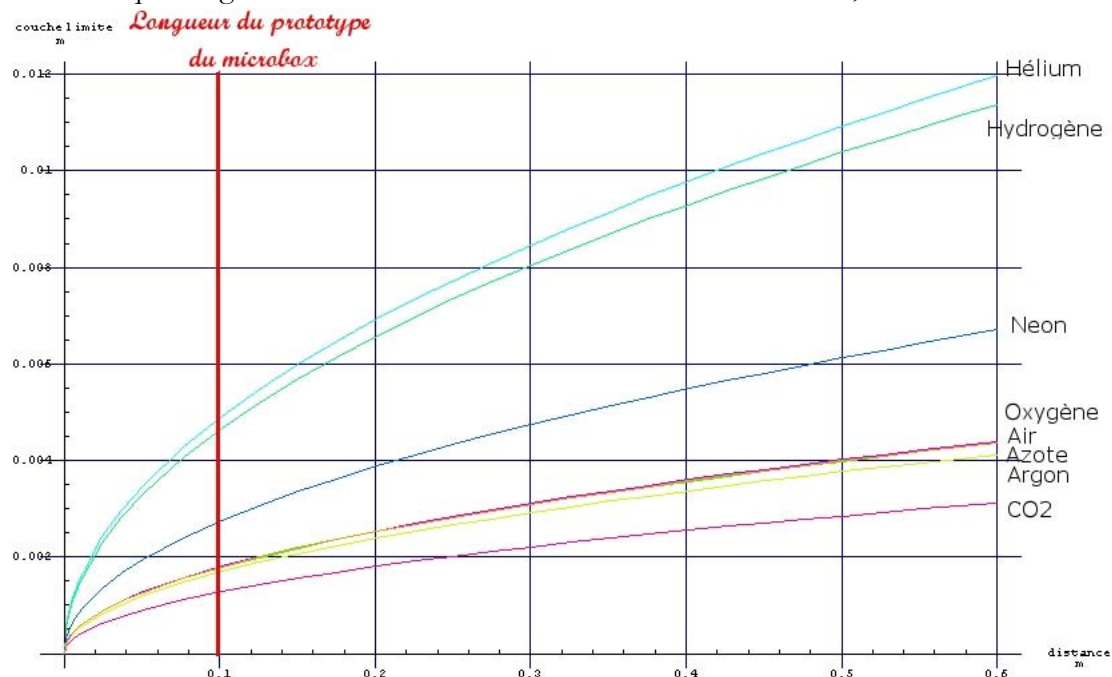


Figure 44 : Couche limite pour différents gaz en fonction de la distance pour une vitesse de 0.5m/s

la simulation sont influencés par l'hypothèse de départ (flux laminaire ou turbulent). Dans ce cas précis nous avons admis que le flux initial était laminaire.

Vu les hypothèses admises, ces résultats ne sont donnés qu'à titre indicatif. Cependant les résultats des mesures de la cartographie de la vitesse de l'air montrent qu'il y a une correspondance entre ces premières simulations et la réalité. Les résultats de ces mesures sont présentés au §4.5.

Nous avons simulé en deux dimensions l'homogénéisateur disposant d'un nombre variable de grilles. Pour diminuer le besoin de ressources informatiques, nous nous sommes limités à ne représenter que la moitié de la section de l'homogénéisateur, l'autre

moitié étant identique par symétrie. La première grille était obstruée à son centre par un disque de 45 mm de diamètre.

La Figure 45 montre la répartition des vitesses pour une configuration qui a 3 grilles. En annexe (section A2) sont données les simulations du même dispositif équipé d'un nombre variable de grilles (une à cinq).

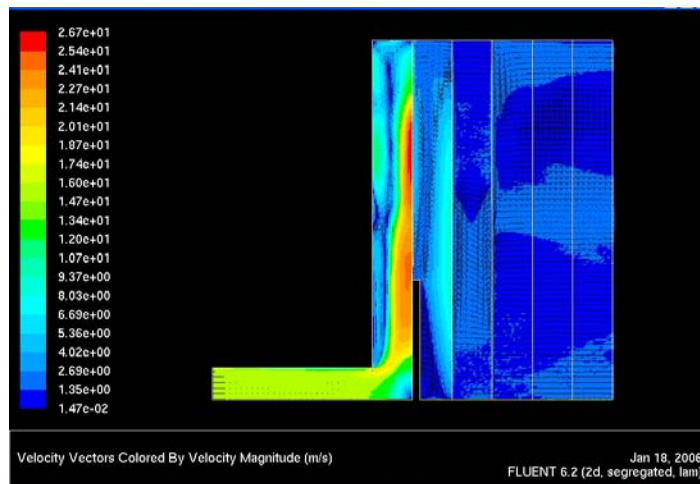


Figure 45: Simulation de la vitesse de l'air pour un dispositif avec 3 grilles dont la première est obstruée au centre

Les résultats de ces simulations confirment ce que nous avons observé avec les mesures : pour assurer un flux uniforme, il faut disposer au moins deux grilles dans l'homogénéisateur afin de créer une perte de charges importante.

4.4. Mesures et expériences

4.4.1. Introduction

Dans cette partie nous avons représenté les expériences et les mesures réalisées pour visualiser le flux, cartographier la vitesse de l'air à l'intérieur du microbox, ou encore prouver la propreté du microbox.

4.4.2. Visualisation du flux laminaire

Pour visualiser le flux de l'air, la technique présentée à la Figure 46 a été utilisée : Devant l'homogénéisateur est tendu un fil métallique, enduit d'huile. En chauffant ce fil par un courant électrique, l'huile dégage une fumée blanche qui est entraînée par le flux d'air que nous voulons visualiser.

Pour augmenter le contraste de la fumée et prendre des photos, un rayon laser est diffusé à travers une lentille longitudinale. Cette lentille transforme le faisceau laser en un plan lumineux. La lentille est posée de telle façon que ce plan soit horizontal. Ainsi seul ce plan qui inclut le fil métallique et la fumée que ce fil dégage sont éclairés. Le résultat est encore meilleur si l'on obscurcit les alentours.

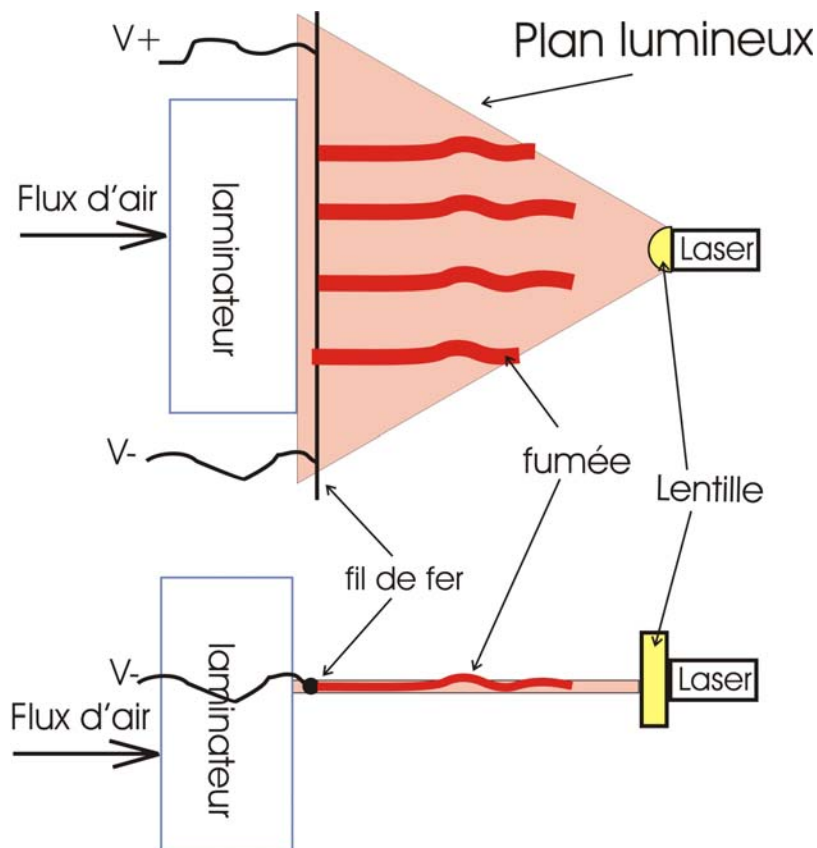


Figure 46: Vue de dessus et de côté du dispositif pour visualiser et mesurer la laminarité du flux

Dans toutes les photos des expériences présentées, la scène a été photographiée depuis en haut comme dans la partie supérieure de la Figure 46. L'homogénéisateur se trouve toujours sur le côté gauche de l'image. Nous pouvons distinguer le fil chauffant qui est juste après l'homogénéisateur.

Pour comparer la laminarité du flux, un petit indicateur en forme d'échiquier a toujours été posé devant l'homogénéisateur. Chaque petit carré a 4 mm de côté. La distance entre la sortie du laminateur et la première turbulence aperçue est nommée "Distance laminaire".

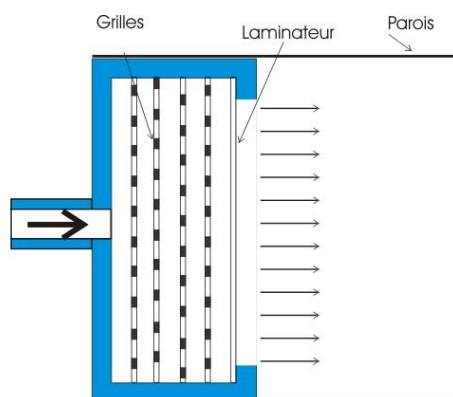


Figure 47: Homogénéisateur du flux d'air

Dans un premier temps nous avons testé le dispositif représenté dans la Figure 47. Il est constitué de 4 grilles d'acier qui ont un taux d'ouverture de 64% avec des trous carrés dont la dimension est 8 mm x 8 mm. Elles sont espacées de 5 mm. A la sortie, nous avons fixé le laminateur après les grilles pour homogénéiser le flux.

Les résultats de cette expérience sont présentés à la Figure 48. Nous constatons que le flux est complètement turbulent à faible ou à forte pression.



Expérience a1

Conditions : 4 grilles espacées de 5mm, suivies du laminateur.
Pression d'entrée de 0,1 bar.
Résultat : Le flux est très turbulent.
Distance laminaire: 0 mm



Expérience a2

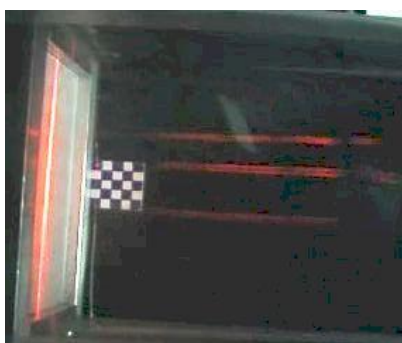
Conditions : 4 grilles espacées de 5mm, suivies du laminateur.
Pression d'entrée de 0,5 bar.
Résultat : Le flux est très turbulent
Distance laminaire : 0 mm

Figure 48: Homogénéisateur composé de 4 grilles et du laminateur. A faible comme à forte pression, le flux est totalement turbulent

De cette expérience nous concluons que la perte de charge, due à ces grilles n'est pas suffisante pour la génération d'un flux homogène et laminaire.

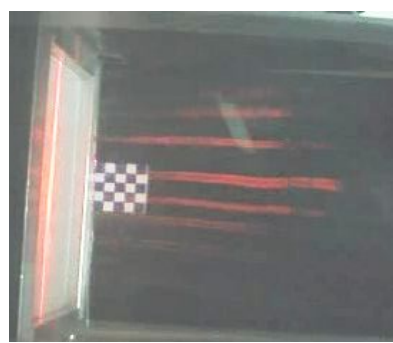
Après de nombreux essais nous avons obtenu de bien meilleurs résultats :

En obstruant les 9 trous centraux de la 1^{ère} grille, la plus proche de l'entrée de l'air, le flux reste laminaire même en variant la pression entre 0,1 et 0,5 bar (Figure 49).



Expérience a3

Conditions : 4 grilles espacées de 5mm, suivies du laminateur. Pression d'entrée de 0,1 bar. Les 9 trous centraux de la première grille sont obstrués.
Résultat : Le flux est laminaire.
Distance laminaire : >80 mm.



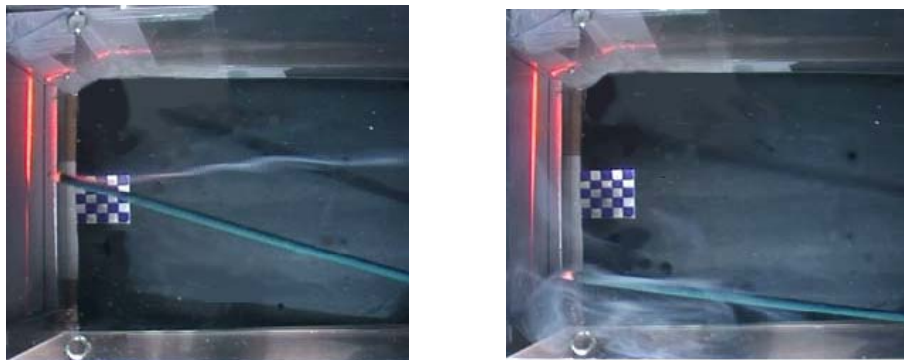
Expérience a4

Conditions : 4 grilles espacées de 5mm, suivies du laminateur. Pression d'entrée de 0,5 bar. Les 9 trous centraux de la première grille sont obstrués.
Résultat : Le flux est laminaire.
Distance laminaire: 70 mm

Figure 49: Le flux avec 4 grilles dont la première a les 9 trous centraux obstrués et le laminateur. Le flux reste très laminaire pour toutes les pressions entre 0,1 et 0,5 bar

En examinant de plus près le dispositif présenté à la Figure 47, il est possible de voir que la section de la conduite change brusquement juste après le laminateur. En effet, l'épaisseur de la structure qui maintient le laminateur fait que la section de la conduite de l'air au niveau du laminateur est plus petite que celle qui est délimitée par les parois. Comme le flux de l'air est laminaire, ce changement de section crée une région de stagnation d'air.

Ce phénomène est mis en évidence à la Figure 50 : La fumée que dégage le bout allumé d'un bâton d'encens permet de visualiser le flux à partir d'un point à n'importe quel endroit désiré de l'homogénéisateur.



**Figure 50: Le flux n'est pas laminaire près des bords de l'homogénéisateur.
Visualisation à l'aide d'un bâton d'encens.**

Pour éviter cette stagnation, la solution idéale serait de ne pas avoir de changement de section à la sortie de l'homogénéisateur. Comme il est nécessaire de disposer d'une structure qui tient les grilles et le laminateur, cette structure a forcément une épaisseur. Par conséquent dans le cas général où plusieurs modules sont disposés les uns à côté des autres ce changement de section à la sortie de l'homogénéisateur constitue une contrainte.

La solution réaliste est d'utiliser des parois obliques qui permettent une transition progressive entre les deux sections, comme montré à la Figure 51. On y constate en effet, grâce au bâton d'encens allumé, que les parois auxiliaires permettent au flux de rester laminaire jusqu'aux parois.

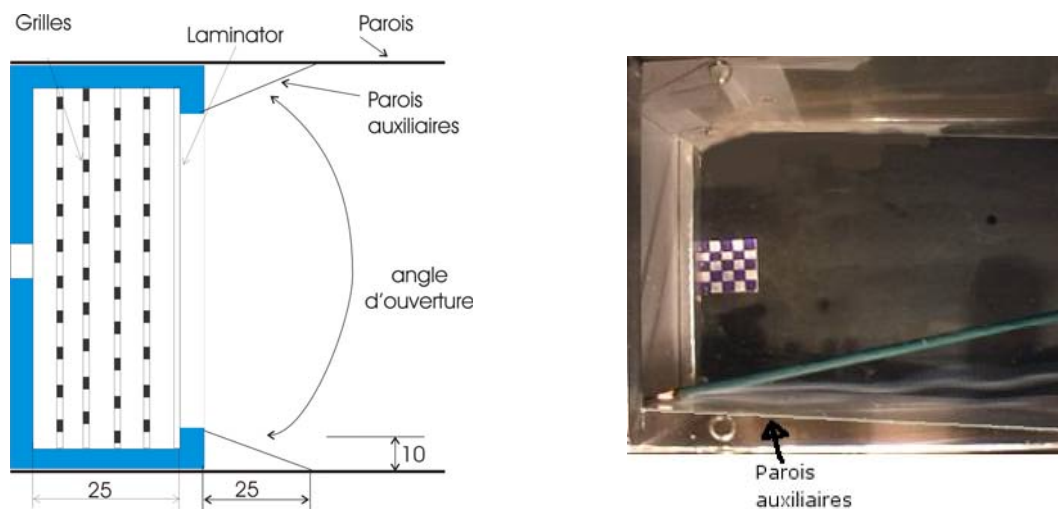


Figure 51: L'utilisation des parois auxiliaires

Nous avons effectué une série des mesures avec différents angles d'ouverture. La configuration testée n'utilise pas des grilles à 64% d'ouverture (*grilles 64*), mais 4 grilles à 43% d'ouverture (*grilles 43*) espacées de 2 mm. La première grille est distante de la deuxième de 15 mm et elle est obstruée sur un diamètre de 45mm (configuration 0-4_15mm 2mm, voir description à la page 74).

Pour chaque angle d'ouverture nous avons mesuré qualitativement s'il se formait des régions de stagnation de la fumé au bord de l'homogénéisateur.

Pression [bar]	90°	53°	44°	37°	28°	22°	19°	16°
0,2	Stagnations	Stagnations	Stagnations	Stagnations	Stagnations	Stagnations	Stagnations	Pas de stagnations
0,3	Stagnations	Stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations
0,4	Stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations
0,5	Pas de stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations	Pas de stagnations

Tableau 5 : Résultats des observations concernant la formation des zones de stagnation d'air au bord de l'homogénéisateur

Nous observons qu'une plus grande pression d'entrée empêche la formation de stagnations, tandis qu'une faible la favorise. De même un faible angle d'ouverture améliore l'homogénéité du flux, au détriment de l'espace disponible entre les microboîtes.

Dans le futur on prendra soin de minimiser la dimension latérale du cadre porteur des grilles. De plus, cette transition de section doit être intégrée dans l'homogénéisateur par des chanfreins sur les bords de la sortie. Un angle d'ouverture de 44° semble suffisant pour cette transition.

4.5. Cartographie de la vitesse de l'air

Un flux laminaire a la même vitesse à tous les points de la section de la conduite. Les expériences citées précédemment ont donné une appréciation globale de la qualité du flux laminaire (laminarité).

Pour avoir une image plus précise de la laminarité du flux, il est nécessaire de mesurer la vitesse à plusieurs endroits dans une section considérée.

La cartographie de la vitesse de l'air mesurée indique indirectement si le flux est laminaire. Car si un flux présente de grands écarts de vitesse dans une même section, cela montre la présence de turbulences, donc l'absence de laminarité. Plus précisément, la moyenne des vitesses de l'air mesurées sur toute la section, ainsi que l'écart type entre elles, donnent une appréciation numérique du flux.

Notre but est donc de créer un flux homogène. Pour y arriver nous pouvons agir sur la forme et le nombre des grilles, leur espacement, mais aussi sur la pression de l'air qui entre dans l'homogénéisateur. Comme il sera expliqué par la suite, il est important d'obstruer le centre de la première grille. Quelques mesures comparatives permettent de déterminer le diamètre optimal de l'obstruction de la première grille.

Pour mesurer localement la vitesse de l'air, nous avons utilisé un anémomètre Testo 400 (Figure 52). Un système de guidage permet de déplacer la sonde aux points de mesure désirés, et de relever leurs coordonnées. Ainsi, on cartographie la vitesse de l'air dans une section choisie du Microbox, avec un pas d'un centimètre. Pour les mesures tout près de la sortie du laminateur, les parois n'influencent pas les résultats. Par contre pour les mesures faites à l'aval du laminateur (voir à la fin de cette section) les parois les influencent. C'est pour cette raison que pour ces dernières mesures les parois sont utilisées.



Figure 52: Dispositif pour la cartographie de la vitesse de l'air après l'homogénéisateur

Les résultats peuvent être classés selon 3 paramètres que nous avons pu faire varier : la pression d'air à l'entrée de l'homogénéisateur, le nombre de grilles utilisées et leur géométrie. La pression d'entrée de l'air est une valeur macroscopique qui influence la vitesse de l'air en fonction de l'impédance du système. La vitesse de l'air agit sur la force de traînée qui est exercée sur les microparticules. Comme nous ne pouvons pas mesurer cette force, dorénavant la pression d'entrée de l'air sera pris comme paramètre de mesure.

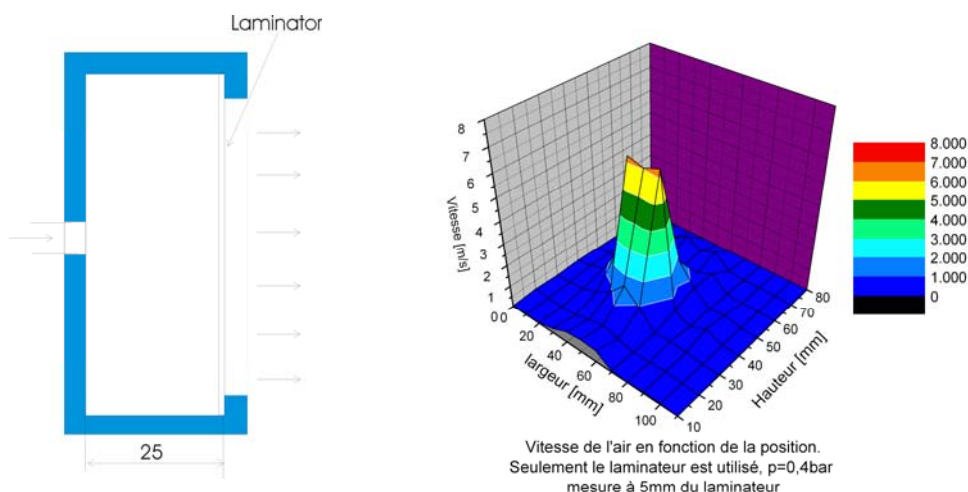


Figure 53: Mesure de la vitesse de l'air. L'homogénéisateur n'est équipé que du laminateur

La première configuration mesurée est présentée à la Figure 53. L'homogénéisateur ne contient que le laminateur. Ce flux n'est pas homogène.

Nous avons répété les mesures en ajoutant à l'homogénéisateur 4 grilles perforées en tôle d'un millimètre d'épaisseur, avec un grand taux d'ouverture de 64% (trous carrés de 8x8 mm), avant le laminateur. Ces grilles sont espacées de 5 mm. Les résultats restent semblables.

A la Figure 54 nous voyons les résultats des mesures avec l'homogénéisateur équipé de ces mêmes 4 grilles, mais avec les 9 carreaux centraux de la première grille obstrués. La pression d'entrée est de 0,5 bar. Les conditions de ces mesures sont celles de l'expérience présentée à la Figure 49.

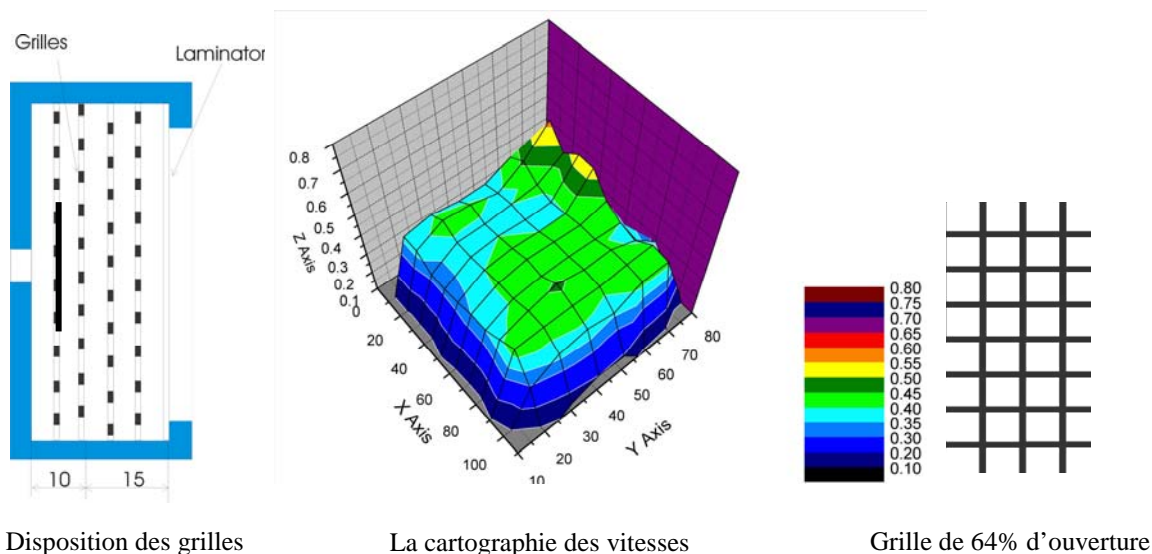


Figure 54: Cartographie de la vitesse de l'air à la sortie de l'homogénéisateur

Les mesures ont été effectuées à 5 mm de la surface de l'homogénéisateur, car l'appareil de mesure ne peut pas s'en approcher davantage.

La valeur moyenne de la vitesse de l'air (si l'on ne tient pas compte des valeurs à la périphérie qui sont très faibles) est de 0,4 m/s et l'écart type est de 0,07 m/s.

Pour augmenter encore la perte de charges causée par les grilles, nous avons effectué un autre essai avec une grille en tôle perforée d'un millimètre. Le taux d'ouverture est de 43% avec des trous de 1,8 mm de diamètre, espacés de 2,6 mm. Dans cette configuration nous avons utilisé une telle grille avec 43% d'ouverture, suivie de 3 grilles de 64% d'ouverture, sans aucune obstruction au centre. Les résultats de ces mesures sont présentés à la Figure 55.

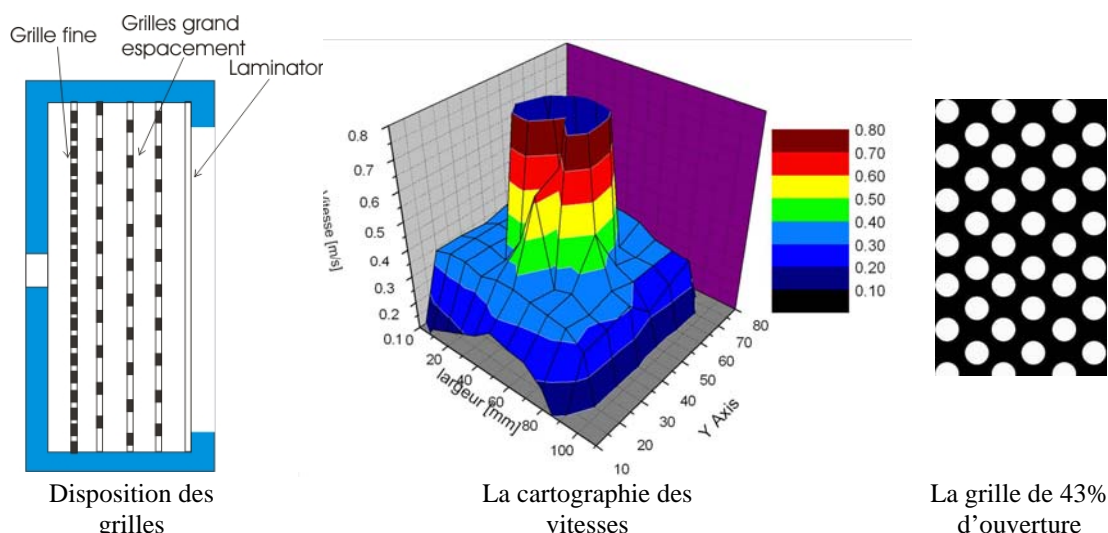


Figure 55: La cartographie des vitesses pour la combinaison de 3 grilles 64 et une grille 43

Dans ce qui suit, les grilles avec 64% de taux d'ouverture sont appelées « *grilles 64* », tandis que les grilles avec un taux d'ouverture de 43% sont appelées « *grilles 43* ».

Ces mesures démontrent que le flux est très important au centre de l'homogénéisateur ; par conséquent une obstruction des trous centraux de la première grille est nécessaire pour rendre le flux plus homogène.

Effectivement, en utilisant 3 *grilles 64%* et une *grille 43%*, obstruée au centre sur un diamètre de 45mm, le flux devient plus homogène comme on le constate à la Figure 56. La vitesse moyenne est de 0,4 m/s et l'écart type est de 0,036 m/s, pour une pression d'entrée de 0,3 bar.

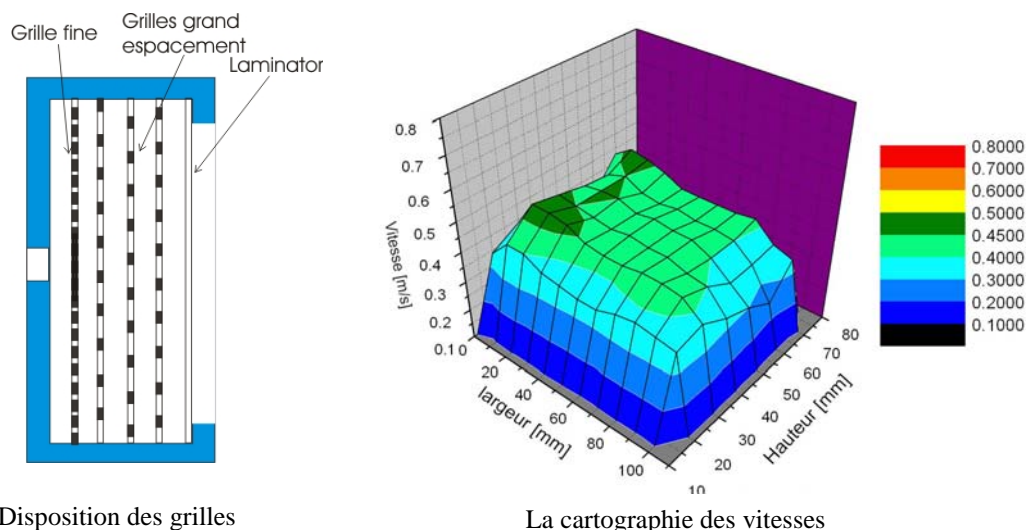


Figure 56: La cartographie des vitesses avec obstruction au centre de la première grille

Les figures suivantes représentent les vitesses moyennes et leur écart type correspondant à plusieurs configurations. Pour toutes les configurations le centre de la première grille est toujours obstrué sur un diamètre de 45 mm et le laminateur est utilisé. Chaque configuration diffère des autres par le nombre, le genre des grilles et la distance entre les grilles. Nous avons testé deux types de grilles : à 64% et à 43% d'ouverture. Leur nombre varie entre 0 et 4 grilles pour chaque type. La distance entre les grilles varie entre 1 et 5 mm.

Dans la légende des figures suivantes, chaque configuration est codée comme suit : Le premier numéro indique le nombre des *grilles 64*, le deuxième le nombre des *grilles 43*, après suit l'espacement entre la première (celle qui est obstruée) et la deuxième grille, puis l'espacement entre les autres grilles. S'il n'a pas d'indication spécifique, le diamètre de l'obstruction de la première grille est de 45 mm. Sinon l'indication "*obst_xx*", indique que ce diamètre est différent en indiquant par *xx* ce diamètre en millimètres.

Ainsi par exemple la configuration 0-4_15mm_2mm_obst55, veut dire que cette configuration n'a pas des *grilles 64*, elle a 4 *grilles 43*, dont la première est distante de la deuxième de 15mm. Les 3 autres grilles sont espacées de 2mm. La première grille est obstruée sur un diamètre de 55 mm.

Comme représenté dans la Figure 57, la pression d'entrée joue un rôle plus important sur la vitesse moyenne que la configuration choisie.

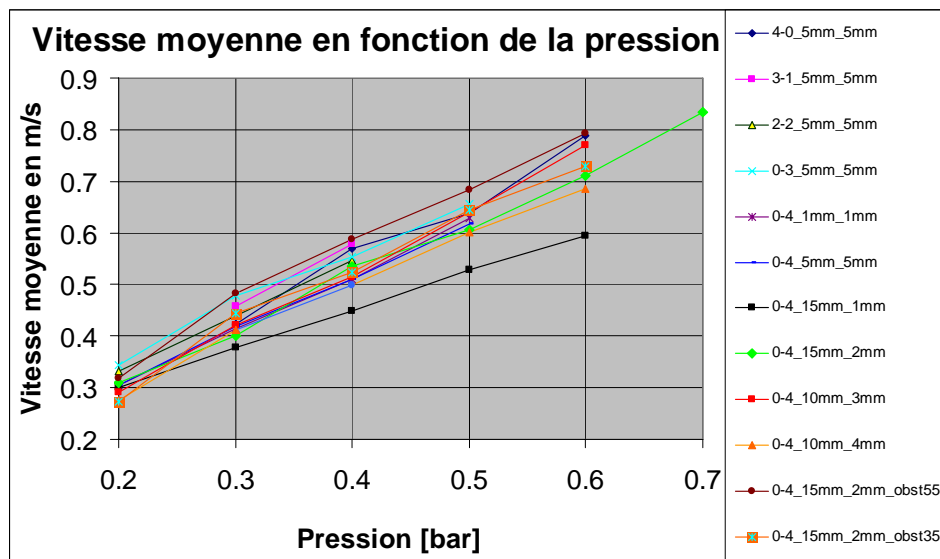


Figure 57: Vitesse moyenne de l'air pour plusieurs configurations de l'homogénéisateur

La Figure 58 met en évidence la qualité de l'homogénéisateur. Effectivement, plus l'écart type des vitesses est faible, plus l'écoulement est homogène et donc laminaire

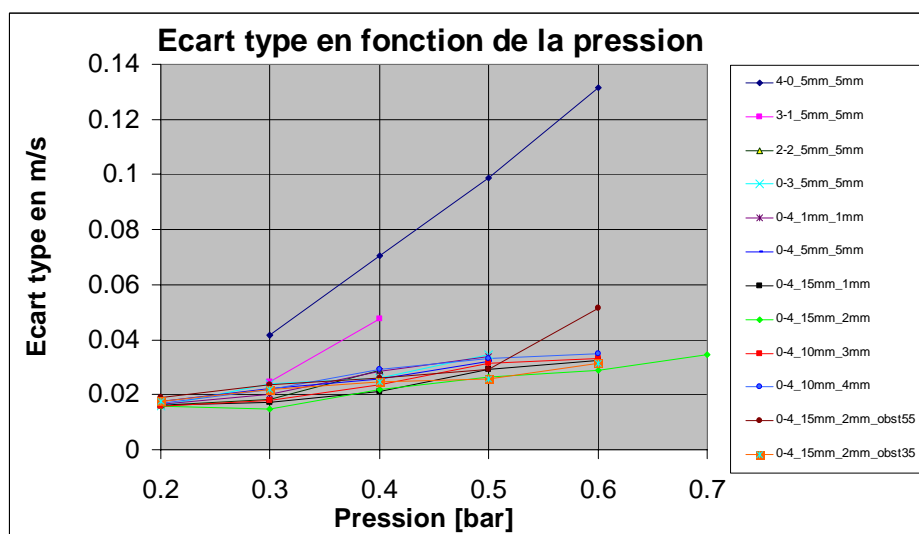


Figure 58: L'écart type des vitesses du flux pour plusieurs configurations de l'homogénéisateur

Les *grilles 64* provoquent des pertes de charge réduites et des vitesses qui ne sont pas très homogènes (écart type plus grand), tandis que les *grilles 43* provoquent suffisamment de pertes de charge pour homogénéiser les vitesses du flux en tout point. Pour atteindre une homogénéisation suffisante on a besoin d'au moins deux *grilles 43*.

Cette même figure montre aussi que l'augmentation de la pression d'entrée a comme conséquence l'augmentation de l'écart type. Quelques mesures en variant le diamètre de l'obstruction au centre de la première grille sont aussi présentées. Nous avons testé la configuration 0-4_15mm_2mm avec une obstruction de 35 mm et 55 mm (configurations 0-4_15mm_2mm_obst35 et 0-4_15mm_2mm_obst55 respectivement). Des conclusions sur ces deux configurations sont données par la suite.

La Figure 58 met en évidence que le flux est plus laminaire si l'on utilise plusieurs *grilles 43*. Dans la Figure 59 les configurations 4-0_5mm_5mm et 3-1_5mm_5mm, qui utilisent respectivement 4 et 3 *grilles 64*, ne sont pas représentées. Cela permet d'agrandir le graphe pour présenter les résultats avec davantage de détails.

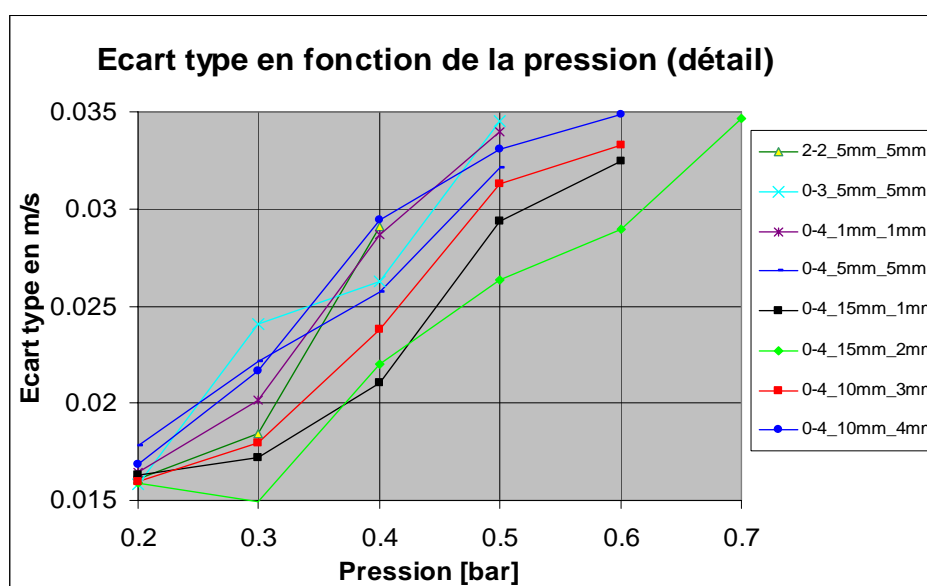


Figure 59: Détail de la Figure 58

Nous constatons que la meilleure configuration (avec un écart type le plus faible) est celle dont les caractéristiques sont 0-4_15mm_2mm. C'est une configuration qui utilise 4 grilles 43 espacées de 2 mm et entre la première grille (celle qui est obstruée à son centre sur un diamètre de 45 mm) et la deuxième il y a un espace de 15 mm. Tandis que les 3 dernières grilles engendrent une perte de charges homogène, l'espacement entre la première et la deuxième grille crée un réservoir qui permet au flux de se stabiliser. La cartographie de cette configuration pour une pression d'entrée de 0,4 bar est montrée à la Figure 61. La vitesse moyenne de l'air est de 0.524 m/s et l'écart type est de 0.022 m/s.

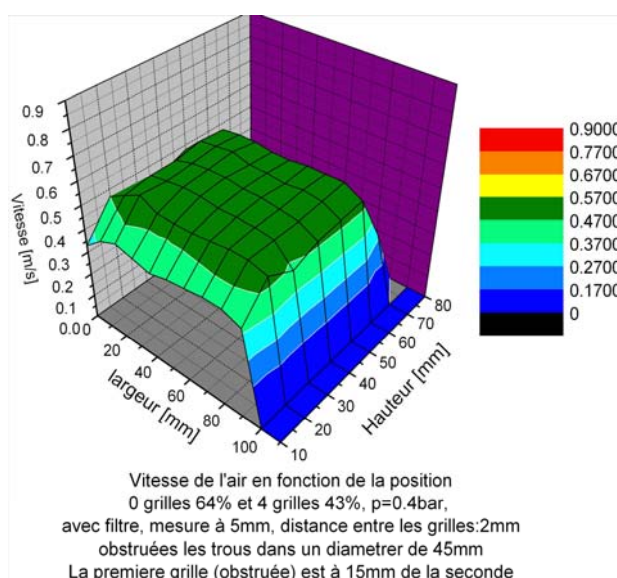


Figure 61: Cartographie de la configuration 0-4_15mm_2mm, à 0,4 bar

La Figure 60 compare l'écart type de la meilleure configuration vue précédemment (0-4_15mm_2mm) qui a une obstruction de 45mm, avec des configurations dont l'obstruction est plus grande (55mm) ou plus petite (35mm). Comme ce graphe le montre, la meilleure configuration reste celle dont l'obstruction est de 45mm.

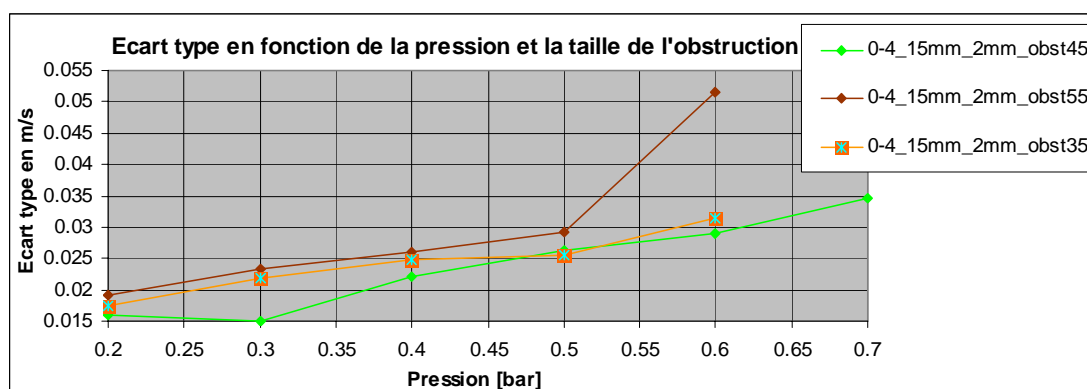


Figure 60: Comparaison de l'écart type pour la configuration 0-4_15mm_2mm_15 avec des obstruction de différentes tailles.

La cartographie de toutes ces mesures se trouve en annexe (section A3).

Nous avons réalisé une série de cartographies des vitesses à différentes distances de l'homogénéisateur. L'homogénéisateur était équipé de 4 grilles 64, plus le laminateur. La première d'entre elles était obstruée à son centre sur un diamètre de 45 mm. La pression d'entrée était de 0,3 bar. Cette configuration n'est pas la meilleure que nous avons réalisée. Néanmoins elle représente l'évolution de la vitesse.

L'examen des figures 62 - 66 montre de façon évidente que la moyenne de la vitesse diminue quand on s'éloigne de l'homogénéisateur. Au moment des mesures, les deux faces latérales du microbox étaient fermées, tandis que la face par laquelle l'air sort, était ouverte. Cette diminution de la vitesse exprime le gradient de vitesse entre la sortie de l'homogénéisateur et la vitesse nulle de l'environnement à l'extérieur du microbox.

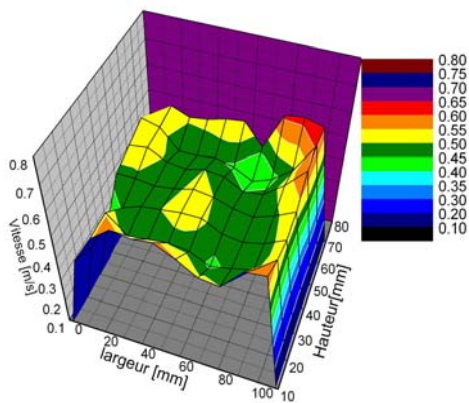


Figure 62: Cartographie des vitesses.
Configuration 4-0_5mm_5mm
Distance 10mm

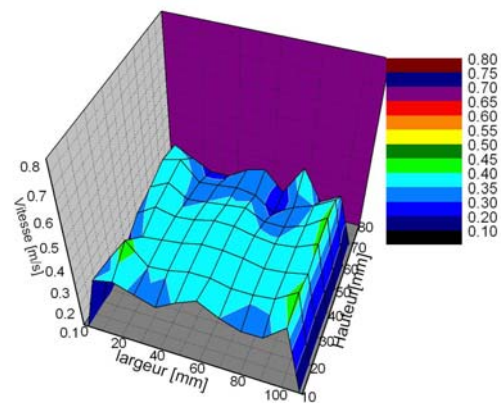


Figure 63: Cartographie des vitesses.
Configuration 4-0_5mm_5mm
Distance 30mm

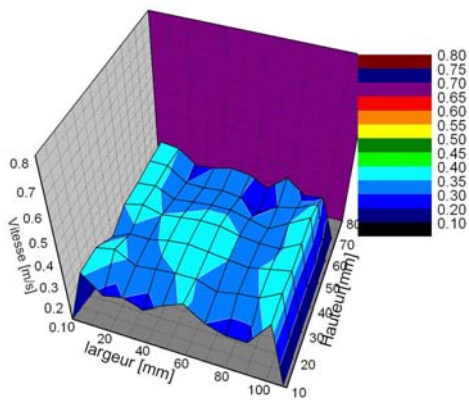


Figure 64: Cartographie des vitesses.
Configuration 4-0_5mm_5mm
Distance 40mm

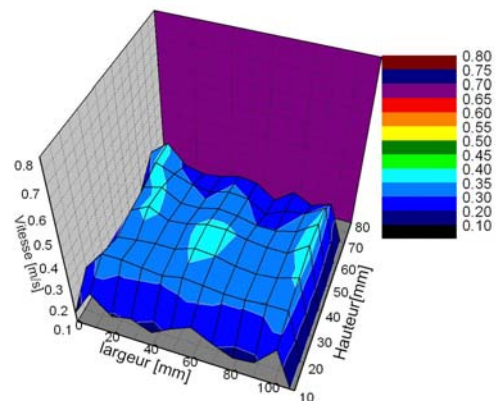


Figure 65: Cartographie des vitesses.
Configuration 4-0_5mm_5mm
Distance 80mm

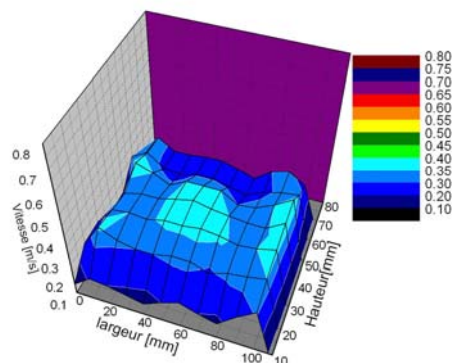


Figure 66: Cartographie des vitesses.
Configuration 4-0_5mm_5mm
Distance 100mm

4.5.1. Conclusions sur la configuration idéale de l'homogénéisateur

Le module de l'homogénéisateur permet de transformer l'air comprimé en un flux laminaire. Ses dimensions sont fixées à une épaisseur extérieure de 30 mm et une section de 100 mm x 70 mm liées à la dimension du microbox. Les ouvertures des grilles utilisées étaient toujours placées de façon décalées les unes par rapport aux autres.

Les mesures ont montré que pour obtenir le flux laminaire il faut assurer les points suivants :

- Avoir au moins 2 grilles en tôle perforée d'une épaisseur d'un millimètre avec un taux d'ouverture de 43% et espacées de 2 mm.
- La première grille traversée par le flux d'air doit avoir son centre obstrué sur un diamètre de 45 mm pour contribuer à l'uniformité du flux.
- Un espacement plus important entre la première et la deuxième grille, conduit à des meilleurs résultats.
- La vitesse de sortie est liée à la pression d'entrée.
- L'utilisation d'un tissu très fin (le lamineur) à la sortie de l'homogénéisateur améliore l'homogénéité du flux.

Les bords de l'homogénéisateur provoquent des zones de stagnation de l'air. On peut les éviter p.ex. soit en chanfreinant les bords de sortie, soit en ajoutant des parois auxiliaires obliques. Un angle d'ouverture de 44° semble suffisant, mais il faudrait encore explorer la possibilité d'augmenter cet angle pour économiser de la place.

La cartographie de la vitesse du flux permet également d'avoir une mesure quantitative du flux. Elle permet d'établir la relation entre la pression d'entrée et la vitesse moyenne de sortie, mais aussi de constater la qualité de l'homogénéisation du flux.

Les configurations qui ont permis d'avoir un flux le plus homogène possible sont celles qui utilisent plusieurs grilles à plus faible taux d'ouverture (43%).

4.6. Mesures de propreté du microbox

La mesure de la propreté du flux à l'intérieur du microbox est faite à l'aide du « *Laser Particle Counter* » de la maison MetOne.



Figure 67: Appareil de mesure des particules dans l'air

Cet appareil aspire l'air ambiant et le fait passer à travers un rayon laser. Les microparticules entraînées, sont détectées, comptées et classées par taille. Cet appareil est réglé suivant la norme « Federal Standard 209 » des USA (voir page 14). Ces normes mesurent la quantité de particules dans un volume d'un pied cube. Pour chaque mesure l'appareil aspire un volume d'air égal à cette quantité. Le temps de mesure est d'approximativement une minute.

Lors de l'expérience présentée dans la Figure 68, la propreté du microbox a été mesurée, sans la présence du robot d'assemblage. Le microbox était posé dans notre laboratoire. Ainsi, initialement régnaient à l'intérieur du microbox les mêmes conditions environnementales que dans le laboratoire, c'est-à-dire les conditions d'une salle ordinaire sans filtration de microparticules.

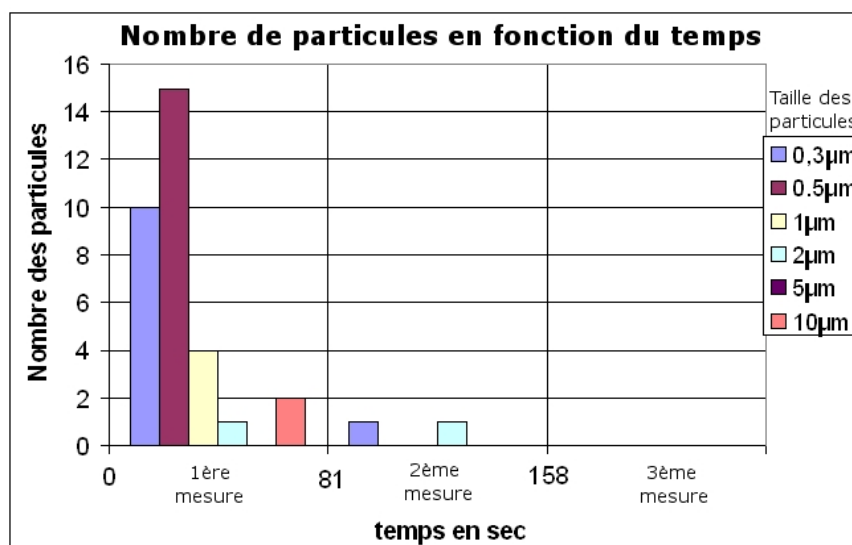


Figure 68: A une pression d'entrée de 0.3 bar, le temps de mise en condition de la salle blanche est moins de 100sec

La mesure débute au moment de l'enclenchement du flux d'air propre en régime laminaire. On constate alors que pour une pression d'entrée de l'air de 0,3 bar, l'environnement du microbox est propre (meilleur que la classe 100) en moins de 2 min. La cadence des mesures étant de 1 min, il n'est pas possible d'obtenir une information plus fine.

Une deuxième série de mesures a été faite avec la même configuration. Cette fois au début de la mesure, le microbox était propre grâce à un flux avec une vitesse de 0,5 m/s pendant 2 minutes avant l'expérience. Les mesures ont été effectuées en variant la pression d'entrée de l'air. La face de sortie de l'air était fermée partiellement pour favoriser une surpression dans le microbox. Les mesures ont été effectuées à 1 cm de la sortie de l'air et le robot n'était pas présent.

Comme illustré dans la Figure 69, l'augmentation de la pression d'entrée entraîne une augmentation du nombre de particules sans pour autant dépasser la classe de propreté de 10.

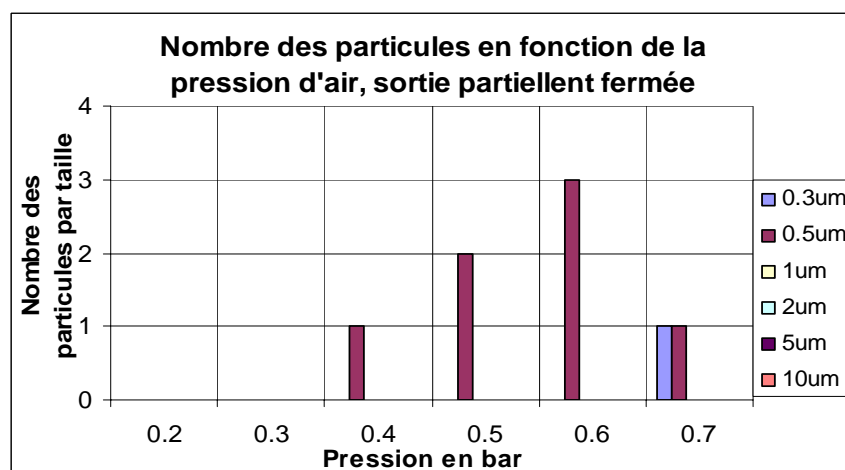


Figure 69: La propreté en fonction de la pression d'entrée de l'air, sortie partiellement fermée

L'obstruction partielle de la face de sortie crée une surpression qui joue un rôle capital dans le maintien de la propreté. L'expérience qui suit montre son importance ; nous avons fait varier la pression d'entrée de l'air, en conservant la face de sortie de l'air complètement ouverte. Ces mesures ont également été effectuées sans le robot mais cette fois la sonde était placée au centre du microbox. La Figure 70 montre qu'à faible, comme à forte pression d'entrée, le manque de surpression a pour conséquence que des particules de l'extérieur viennent perturber les mesures.

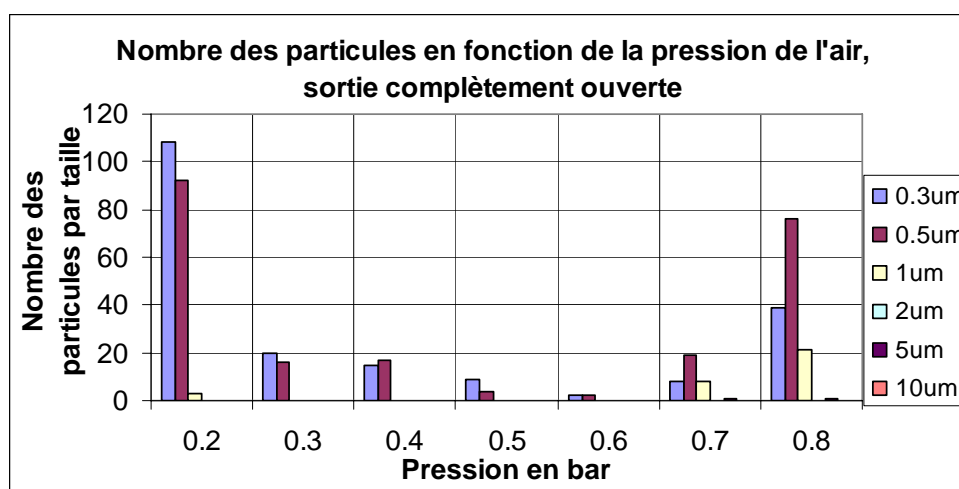


Figure 70: Nombre des particules en fonction de la pression d'entrée, sortie complètement ouverte

Quand la pression d'entrée est de 0,5-0,6 bar, la classe de propreté est très bonne et elle atteint la classe 10. La propreté se détériore pour des pressions plus faibles (0,3 à 0,4 bar) pour atteindre la classe 100. Finalement, pour une très faible pression (0,2 bar) comme pour des pressions plus élevées (0,7 à 0,8 bar), la présence des particules plus grandes que 0,5 mm, montre que la propreté est de classe 1000.

Quand la pression de l'entrée de l'air est faible (0,2 bar), l'aspiration de l'appareil de mesure devient importante par rapport au débit de l'air du microbox. Ainsi des particules extérieures au microbox sont aspirées par l'appareil. Cela explique pourquoi à faible pression la classe de propreté est moindre.

La détérioration de la classe de propreté à partir d'une pression de 0,6 bar peut être expliquée par l'apparition de turbulences qui commencent à se créer à partir d'une vitesse de 0,6 m/s. Ces turbulences (en absence de surpression) amènent des particules dans le microbox. Cette hypothèse est confirmée par la Figure 40 quand nous avons étudié le nombre de Reynolds. Effectivement, à partir d'une vitesse de 0,6 m/s (pression de 0,6 bar pour cette configuration), le flux n'est plus entièrement laminaire. Il existe donc une limite dans la pression (et donc la vitesse) de l'air que nous pouvons introduire dans le microbox, au-delà de laquelle des turbulences amènent davantage de particules que celles que nous désirons repousser.

Cette expérience démontre l'importance de l'obstruction partielle de la face de sortie de l'air pour favoriser la surpression dans le microbox, d'autant que l'appareil de mesure aspire de l'air pour pouvoir effectuer des mesures. Toutes les mesures qui suivent sont faites avec la face de sortie de l'air partiellement obstruée.

Un autre paramètre qui influence la propreté est le "prélavage" du microbox. Par ce terme nous entendons un temps de mise en marche durant lequel nous laissons un flux d'air propre et de grande pression (1 bar) circuler durant 1 minute. Le but de ce prélavage est que le flux turbulent ainsi créé, arrache toutes les particules qui se trouvent accrochées aux parois du microbox ou du robot, afin de garantir une meilleure propreté par la suite.

La Figure 71 résume les mesures faites avec et sans ce "prélavage", soit quand le robot est immobile à la position initiale, soit pendant la procédure d'introduction de la palette dans le microbox (mouvement du robot, amenée de la palette sous l'ouverture de la microbox, phase de lavage de la palette, ouverture de la porte du microbox à l'aide du robot).

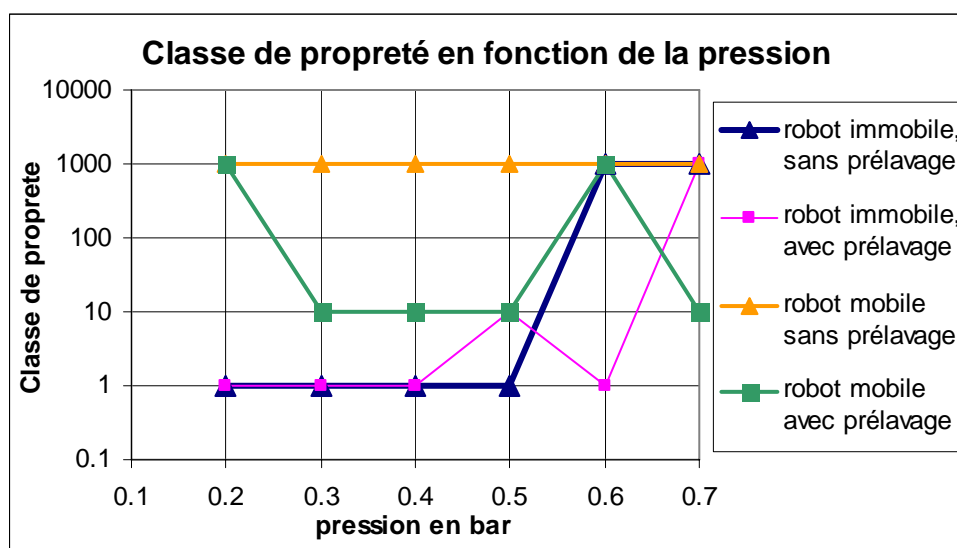


Figure 71: Influence du "prélavage" sur la propreté du microbox sans et avec le fonctionnement du robot

L'utilisation du prélavage permet d'améliorer les résultats, surtout pour les mesures durant le fonctionnement du robot (phase d'entrée de la palette) et ainsi passer de la classe de propreté 1000 à la classe 10 pour les pressions de 0,3-0,5 bar qui est la plage de pression nécessaire pour le microbox.

Pour chaque pression d'entrée de l'air, 6 mesures consécutives ont été réalisées pour permettre d'avoir une vision statistique de la réalité. Toutes ces mesures figurent en annexe (section A4).

A 0,6 bar, quand le robot est mobile et un prélavage est effectué, les 4 sur les 7 mesures effectuées montrent un degré de propreté de classe 10. Comme nous pouvons le

voir en annexes (section A4, p.130), sur 3 de ces mesures, des particules de 1 μm ont été présentes, ce qui dégrade la propreté à la classe 1000. Donc à partir de cette pression la classe de propreté est maintenue (voir les autres mesures), mais il arrive que des particules encore accrochées se détachent de temps à autre. Il est donc préférable de travailler avec des pressions plus faibles pour pouvoir garantir que la propreté est toujours maintenue.

4.7. Conclusions

Au cours de ce chapitre la problématique du flux laminaire et propre a été développée. Pour la Microfactory il est important de démontrer qu'il est possible de réaliser un flux laminaire, compact et propre.

Les filtres à air comprimé utilisés pour cette application permettent de filtrer l'air comprimé d'un réseau d'entreprise et de le rendre compatible avec celui d'une salle blanche. En utilisant le réseau d'air comprimé que la plupart des usines possèdent, on supprime la nécessité d'avoir recours à des ventilateurs. De surcroît il est envisageable d'utiliser des bonbonnes de gaz comprimé, si le produit est sensible à l'air ambiant.

Les mesures de propreté ont montré que pour avoir des meilleurs résultats en termes de propreté, il faut obstruer partiellement la face de sortie pour créer une petite surpression à l'intérieur du microbox. Lors du démarrage du microbox il est important d'avoir une phase de "prélavage", c'est à dire une phase durant la quelle un flux d'air à grande pression (1 bar), arrache toutes les particules qui sont accrochées aux parois. Après cette phase, et même durant le fonctionnement du robot, le microbox dispose d'un degré de propreté classe 10 pour des pressions usuelles (0,3-0,5 bar), sinon pour des pressions plus importantes (jusqu'à 0,7 bar), la classe de propreté passe à 1000.

La deuxième difficulté a été de transformer cet air comprimé en un flux laminaire. Pour y parvenir, on a conçu et réalisé un dispositif appelé homogénéisateur. Il contient plusieurs grilles d'ouverture déterminée, mais il est important d'obstruer le milieu de la première grille que l'air rencontre, pour obtenir l'homogénéisation du flux. La meilleure configuration trouvée comporte 4 grilles avec un taux d'ouverture de 43%, espacées de 2 mm. Entre la première et la deuxième grille, l'espacement est plus grand (15 mm).

Le rétrécissement brusque de la section du flux que les parois de l'homogénéisateur provoquent à sa sortie, introduit des zones de stagnation de l'air. Elles sont supprimées facilement avec un élargissement progressif (parois obliques ou chanfrein).

La petite taille de la microbox et la faible génération des particules pourrait permettre d'autres solutions que le flux laminaire et continu. Il serait possible par exemple d'avoir un lavage de la zone de travail à l'air turbulent mais propre pour enlever les particules décollés, puis un arrêt du flux pendant l'opération d'assemblage. Ce lavage serait nécessaire entre les opérations d'assemblage ou juste avant l'introduction d'une nouvelle palette, en fonction des besoins du produit. Pour pouvoir arrêter le flux pendant les opérations il serait nécessaire de fermer le microbox durant l'arrêt du flux. Ce concept n'est pas développé au cours de cette thèse.

Chapitre 5. Concepts pour la microfactory

Les chapitres précédents ont permis de développer une procédure qui donne au concepteur les outils pour décider rapidement la disposition des parties de la Microfactory et leur taille. Nous avons également proposé une technique, dont nous avons effectué la démonstration, qui permet d'avoir un environnement propre localement.

Le présent chapitre propose certains concepts possibles pour réaliser la Microfactory. Durant ce travail de thèse, nous avons réalisé un microbox basé sur un de ces concepts. Les autres concepts sont au stade d'idées de base et restent encore à développer. Le §5.1 présente ces différents concepts avec leurs avantages et inconvénients. Le §5.2 présente le concept de la PocketFactory réalisée et en particulier les solutions choisies pour ses parties.

5.1. Concepts

L'idée de base de ces concepts est d'avoir un environnement localement propre autour d'une chaîne de montage. Pour avoir une flexibilité maximale, les concepts modulaires constituent un avantage. Il a été admis que chaque module devait avoir une surface de travail d'environ 100 mm x 100 mm et une hauteur de 70 mm. Plusieurs concepts sont présentés ci-après.

5.1.1. Microfactory à recyclage de l'air

Ce premier concept est très semblable au fonctionnement d'une salle blanche classique. Chaque module dispose d'un filtre et d'un ventilateur indépendants et l'air y circule en circuit fermé.

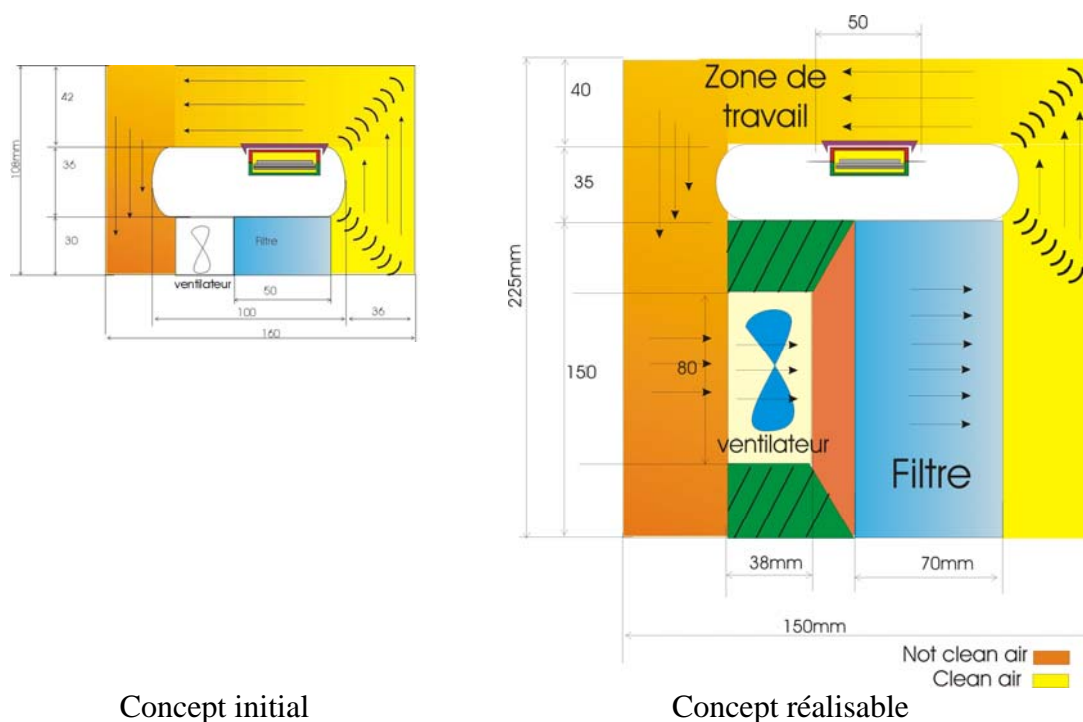


Figure 72: Concept de module avec recyclage de l'air

Il est possible, comme c'est fait également (selon le procédé appliqué) dans les salles blanches, de ne récupérer qu'une partie de l'air et d'injecter avant le ventilateur un pourcentage d'air frais. Cela permet d'une part d'extraire une partie des gaz polluants et des particules générés durant les opérations et d'autre part de prolonger la durée de vie du filtre.

Il est également possible d'imaginer que ce système puisse fonctionner avec un autre gaz que l'air (Azote par exemple), vu qu'il peut être complètement isolé du monde extérieur, ou encore être utilisé pour une application biomédicale pour laquelle il faut éviter l'échange des microorganismes (microbes, virus ou autres) avec l'extérieur. Dans ces cas il faudra filtrer la partie de l'air qui sera extrait du circuit pour ne pas contaminer l'environnement extérieur.

Malgré les quelques avantages que ce concept présente, il est difficilement réalisable, comme déjà montré au §4.1. En effet, les dimensions d'un filtre HEPA (150 mm x 150 mm x 70 mm) et du ventilateur axial nécessaire (80 mm x 80 mm x 38 mm) sont disproportionnées par rapport de la grandeur de la place de travail désirée (100 mm x 100 mm). La Figure 72 illustre la différence entre le concept initial et le concept réalisable.

5.1.2. Microfactory à air comprimé

Pour contourner le problème d'encombrement exposé au paragraphe précédent, ce concept à air comprimé n'utilise pas de filtres HEPA, ni des ventilateurs.

L'air vient du réseau d'air comprimé et il est filtré par un filtre compact spécifique pour les gaz sous pression comme développé au §4.1. L'air n'est pas récupéré après avoir balayé la zone de travail. L'utilisation d'autres gaz sous pression est également envisageable sans récupération, si l'application nécessite un gaz spécial.

Nous avons retenu ce concept pour la réalisation du prototype.

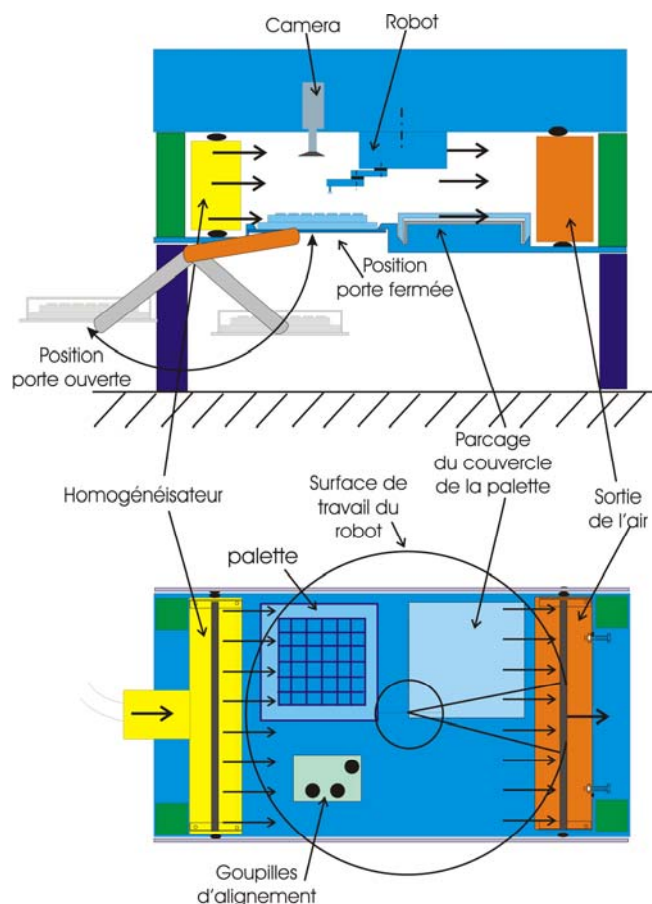


Figure 73: Vue de côté et de dessus du concept de la microfactory réalisée

Le choix d'utiliser de l'air comprimé permet d'avoir un design plus compact et facilement adapté à l'installation d'air comprimé d'une entreprise.

Le robot d'assemblage utilisé est fixé au plafond de la Microfactory. Cela permet d'économiser l'espace au sol, tout en gardant à l'extérieur de la zone de travail toutes les parties du robot qui risquent de générer des microparticules. Une légère surpression dans la zone de travail permet d'éviter que des microparticules de l'extérieur y pénètrent.

5.1.3. Microfactory sur table rotative

Ce concept combine la table rotative qui est couramment utilisée dans l'assemblage automatique, avec un environnement propre.

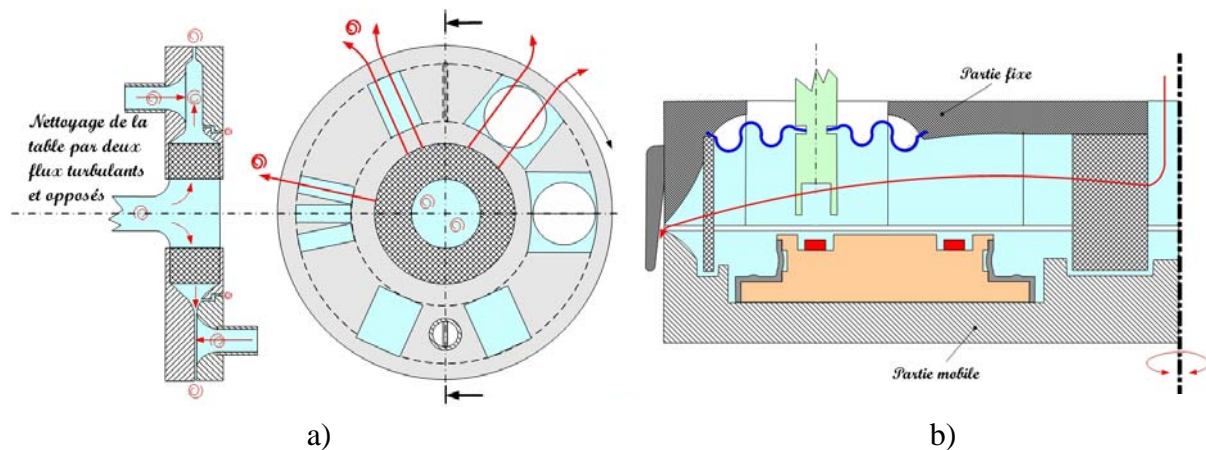


Figure 74: Minienvironnement sur table rotative

Il est constitué d'une table rotative sur laquelle sont posés les composants à assembler. Cette table est couverte par une partie immobile sur laquelle sont fixés les robots et autres machines d'assemblage. Une membrane entre les extrémités des machines et la partie fixe du système garantit que les microparticules de l'environnement extérieur ne pénètrent pas dans la zone de travail, tout en laissant au robot la possibilité de faire les déplacements et les opérations nécessaires pour à l'assemblage (voir Figure 74b).

Entre les deux parties, un flux radial expulse toutes les microparticules de la zone de travail. L'air utilisé est de l'air comprimé et filtré. Au centre de chaque plaque rotative un homogénéisateur circulaire permet de transformer l'air comprimé en un flux laminaire (voir Figure 74a).

Pendant le fonctionnement normal, un flux laminaire et radial garantit la propreté à l'intérieur du système. Lors de la mise en marche, un nettoyage par jet d'air propre, mais turbulent, se met en marche en même temps que le flux laminaire. Le système dispose de deux flux turbulents ; l'un est fixé sur la plaque inférieure et se dirige vers le haut. L'autre est fixé sur la plaque supérieure et se dirige vers le bas. Quand la table rotative fait une rotation complète, les deux flux auront nettoyé respectivement l'intérieur des parties supérieures et inférieures du système. Ce flux turbulent détache toutes les microparticules qui sont collées aux parois et le flux laminaire les évacue. Si des microparticules adhèrent tellement bien aux parois que le flux turbulent ne peut pas les décrocher, elles vont y rester aussi durant la phase de fonctionnement normale, sous le flux laminaire. On peut donc admettre qu'elles ne présentent pas de risque pour les composants à assembler.

Un système de tables rotatives intermédiaires permet de transférer les composants d'une table rotative à la suivante sans passer par l'environnement extérieur, comme le montre la Figure 75. Sur chaque table rotative il y a plusieurs espaces pareils à des microboxes, marqués par des rectangles en traitillés. La partie supérieure de ces espaces reste immobile, les robots ou autres machines peuvent entrer par une ouverture et procéder aux opérations d'assemblage ou d'usinage. Une membrane élastique permet de faire le lien entre la partie immobile et ces appareils de manière à protéger les composants des microparticules extérieures [49]. La partie inférieure de ces espaces est fixée sur les tables rotatives.

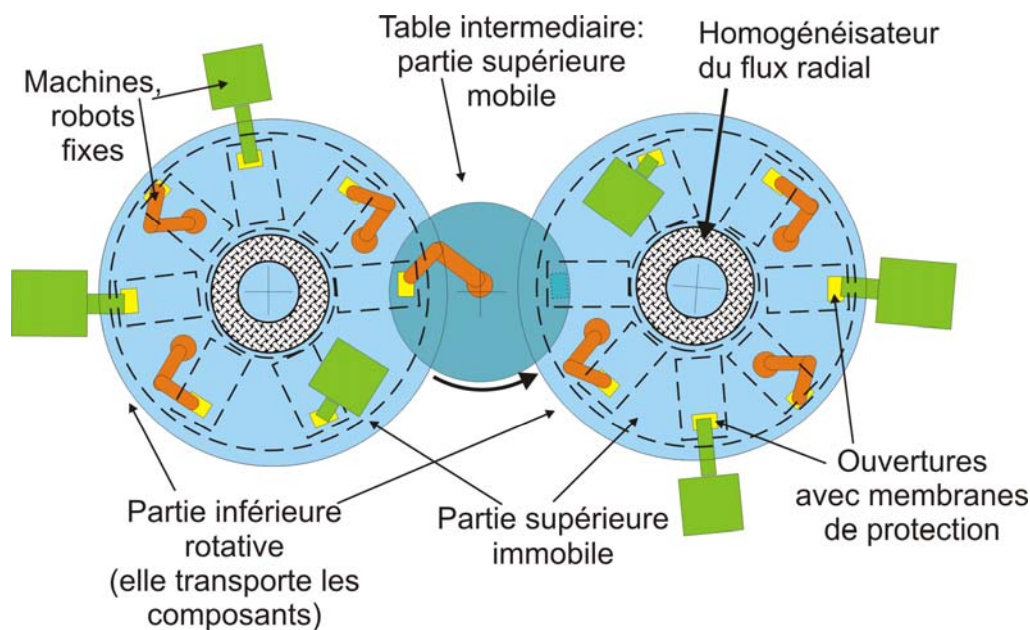


Figure 75: Vue de dessus du concept de la microfactory sur table rotative

Ce concept n'a jamais été réalisé, ni testé pour vérifier son efficacité quant à la propreté de son environnement. Le fait qu'il pourrait être adapté à un système d'assemblage conventionnel le rend très intéressant. Il a l'avantage de ne pas avoir besoin de robot pour transporter les composants, ni de convoyeur.

Il est à noter que ce concept n'est pas totalement incompatible avec le précédent. Effectivement, le système de flux d'air laminaire est le même, les robots d'assemblage se trouvent fixés au plafond comme au système précédent et il suffit que la partie inférieure du concept du §5.1.2 soit montée sur une table rotative. Ainsi nous pouvons attendre que les résultats des mesures de la propreté de ce système seront comparables à notre prototype.

5.1.4. Disposition des microboxes

Ce paragraphe va présenter les différents concepts concernant la disposition des microboxes et le transport des pièces entre eux-ci. Pour tous ces concepts il est admis que le flux de l'air propre est horizontal pour empêcher la déposition des microparticules sur les surfaces des composants.

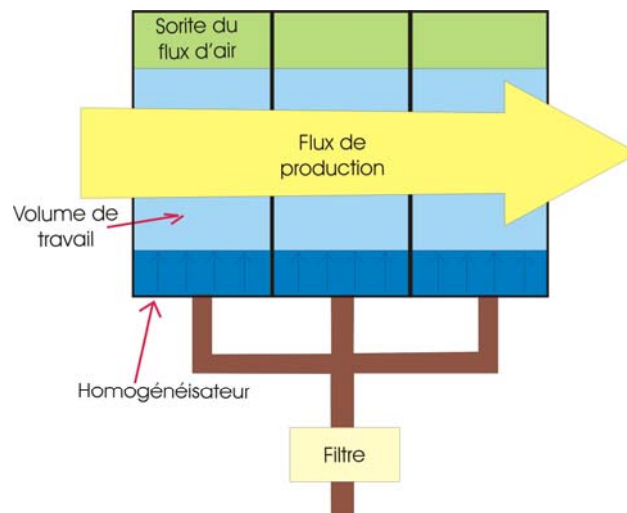


Figure 76: Disposition de la Microfactory envisagée

La Figure 76 présente la disposition des modules de la Microfactory, les uns à côté des autres. Nous avons choisi cette disposition pour le prototype réalisé. Chaque module comporte un robot de transfert. Il déplace les composants entre les différentes machines et vers les microboxes voisins. Le flux de production est garanti par ces robots. L'avantage de cette solution est que les composants sont transférés toujours dans un environnement propre. Aucune protection n'est donc nécessaire pour leur transfert. L'aspect modulaire permet de reconfigurer rapidement la chaîne d'assemblage et de remplacer un module défectueux très rapidement.

Dans cette configuration un seul filtre d'air comprimé peut filtrer l'air pour l'ensemble des modules.

Une autre possibilité est l'utilisation d'un convoyeur comme analysé au §3.8.2. Ce concept avait un convoyeur compatible salle blanche, intégré dans les microboxes. Ainsi les composants pouvaient être transportés entre les machines sans nécessiter d'être protégés des microparticules. La Figure 77 présente une alternative à ce concept. Les composants sont transportés dans des palettes fermées qui les protègent des microparticules durant leur transport. Par conséquent, il n'est plus nécessaire d'avoir un convoyeur compatible avec l'environnement propre, ni de l'intégrer dans les microboxes. Cela permet de disposer les microboxes d'une façon plus flexible comme la figure ci-dessous le montre.

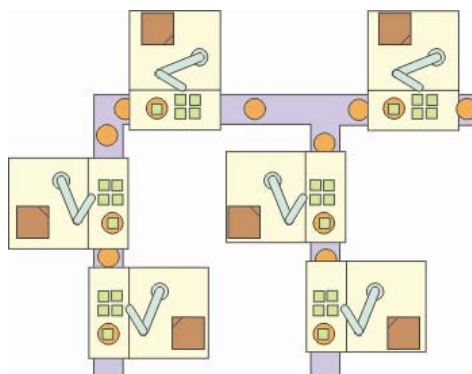


Figure 77: Utilisation de convoyeur pour le transport des pièces entre microboxes

Le concept montré à la Figure 78 intègre un convoyeur compatible avec l'environnement propre et ainsi les composants peuvent être transportés sans nécessiter de protection. La disposition des microboxes de part et d'autre du convoyeur permet

d'avoir de la place autour de chaque microbox pour y placer des appareils nécessaires à l'assemblage. Cela présente l'avantage que la partie la plus encombrante des appareils reste à l'extérieur de l'environnement propre.

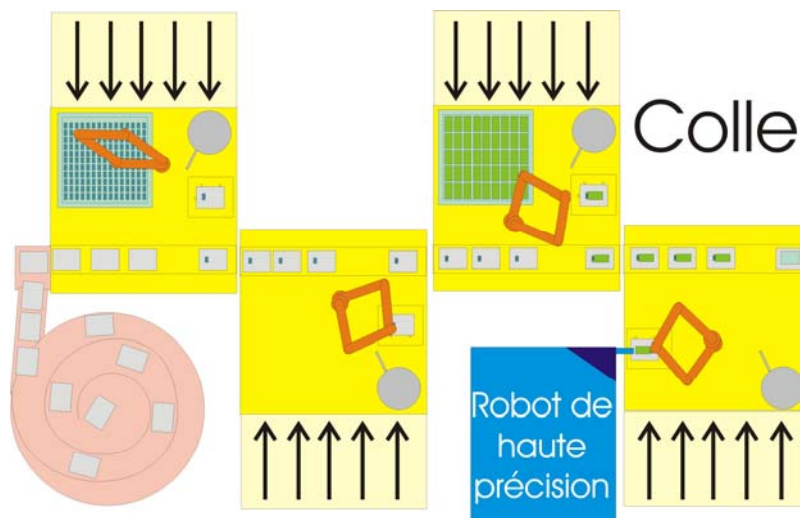


Figure 78: Microboxes disposées en alternance

L'inconvénient de cette disposition est que les flux d'air de deux microboxes voisins sont opposés et se créent ainsi des turbulences à leur interface. Cet inconvénient peut être évité en utilisant des parois latérales pour chaque microbox en laissant qu'une petite ouverture pour le transfert des composants.

5.1.5. Conclusion sur les concepts

Ces concepts et encore quelques autres présentés en annexe (section A5) montrent qu'il y a encore un potentiel intéressant et un grand domaine de recherche à explorer.

Les paragraphes qui suivent sont consacrés au concept réalisé. C'est le concept présenté au § 5.1.2, où le flux laminaire est généré à partir de l'air comprimé.

5.2. Application pratique : la Pocket Factory

Le but principal de cette thèse a été de trouver une méthodologie pour le développement rapide d'une chaîne de production miniature et modulaire. Un prototype a été réalisé pour démontrer la faisabilité, mais aussi pour se confronter directement à la problématique de la conception face à une situation proche d'un cas industriel.

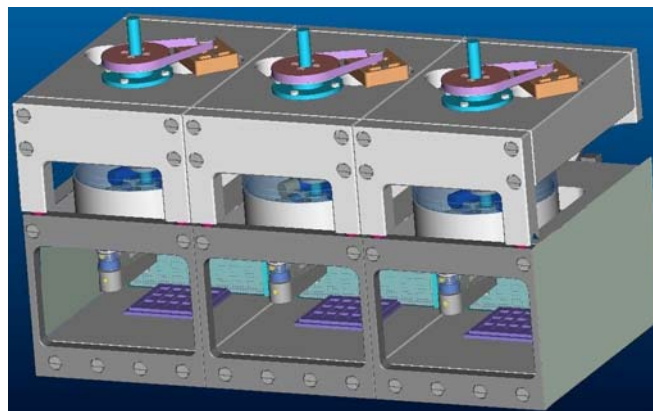


Figure 79: Principe d'une microfactory à 3 microboxes

Plus précisément le prototype réalisé est un « Microbox », c'est-à-dire une des boîtes modulaires qui constituent la microfactory (voir Figure 79).

Le volume de travail adopté pour le premier prototype dans le cadre de ce projet était de $0,7 \text{ dm}^3$. La surface utile est égale à quatre fois la surface d'une palette de 2" ($\sim 50 \times 50 \text{ mm}$). Cette petite taille lui a donné le nom de « Pocket Factory ». Une photo de ce prototype, ainsi que quelques explications des parties qui le constituent sont présentées à la Figure 80.

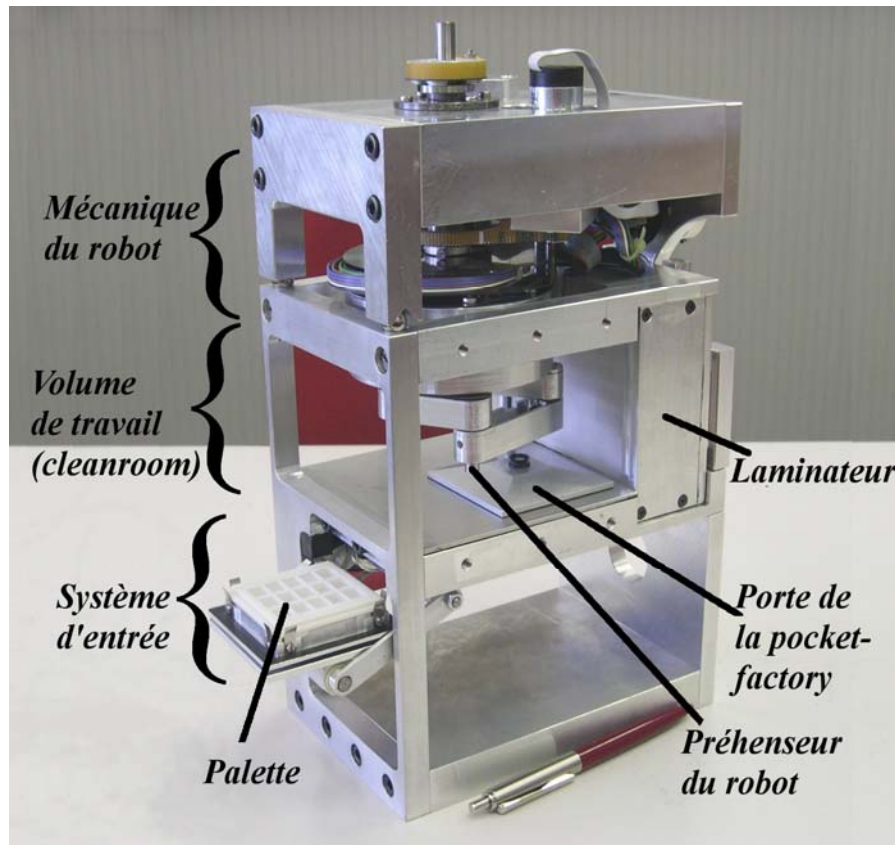


Figure 80: La Pocket Factory

Comme montré dans la Figure 79, l'idée de la Pocket Factory est une chaîne sérieelle de stations d'assemblage (microboxes). Chaque microbox dispose :

- ⇒ D'un système de filtration et homogénéisation de l'air. Ce système permet de transformer, après la filtration, l'air comprimé en un flux laminaire.
- ⇒ D'un robot manipulateur qui transfère les composants de la palette à la machine d'assemblage. Après l'assemblage il transfère le sous-ensemble terminé à un endroit accessible par le robot du microbox suivant, et ainsi de suite.
- ⇒ D'un système qui permet d'entrer et de sortir les palettes sans pour autant entraîner des contaminants dans le microbox ou sur les composants.
- ⇒ D'une machine spécifique à l'opération nécessaire (sertissage, collage, soudage, lavage, etc.)
- ⇒ D'un système de vision qui permet à un ordinateur central de contrôler et diriger les opérations. Ce système n'a pas été élaboré dans le cadre de cette thèse, puisque de tels systèmes optiques existent actuellement sur le marché.

Si un microbox est à l'extrémité de la chaîne d'assemblage, son côté latéral est fermé pour empêcher l'expansion latérale du flux, ou que des microparticules pénètrent dans la zone de travail.

Le côté opposé à l'homogénéisateur est partiellement fermé. Cela protège le flux laminaire de tout courant extérieur. De plus il contribue à la création d'une surpression interne qui empêche les microparticules externes d'y entrer tout en laissant les microparticules internes de sortir.

La suite du chapitre explique les principes et le fonctionnement de chacune de ces parties.

5.2.1. La partie fluidique

Cette partie a été développée et expliquée au §4.4. L'air propre est créé en filtrant l'air comprimé du réseau d'une usine. Dans ce but on utilise les éléments suivants : un pré-filtre qui retient les microgouttes d'huile et un filtre d'air comprimé qui retient les microparticules. Cet air filtré, mais sous pression, est transformé en un flux laminaire grâce à un homogénéisateur. L'homogénéisateur est un dispositif qui contient des grilles en tôle perforée. A noter qu'après le filtrage il faut prévoir une prise d'air pour le « lavage » du sas (§5.2.5) et la création du vide nécessaire au préhenseur du robot.

5.2.2. Le robot

Pour le prototype de la Pocket Factory, il s'est avéré nécessaire d'intégrer un petit robot pour manipuler les composants. Il devait être très compact et compatible avec un environnement propre (ne pas générer des particules). Une recherche parmi les robots disponibles du marché nous a montré que les robots, dont le volume de travail correspondait à notre microbox, avaient un grand encombrement. Et comme la miniaturisation était une des priorités de ce projet, il n'a pas été possible d'utiliser un de ces robots.

Ainsi deux robots ont été réalisés sur mesure, pour ce projet : L'un au cadre de cette thèse au LSRO de l'EPFL et l'autre par l'Ecole d'Ingénieurs de Bienne (HTI) avec le support du CSEM à Alpnach.

Celui développé par le LSRO est un robot hybride, type SCARA. Il a l'avantage de pouvoir passer les sous-ensembles aux microboxes voisins.

Le robot développé par le CSEM est du type Delta. Sa structure parallèle lui permet d'être très rapide, mais son volume de travail limité (ne dépasse pas le microbox), impose la présence d'un convoyeur.

5.2.3. Le robot « Pocket SCARA » de l'EPFL

Il s'agit d'un robot hybride, type SCARA [50], [51]. Son volume de travail est défini par un cylindre ($\varnothing 130$ mm x 20 mm) englobant le carré de la plage de travail du microbox. Cela permet de déplacer les composants au delà des bords la surface carrée du microbox pour entrer dans le volume de travail du robot suivant et de pouvoir ainsi lui transmettre les sous-ensembles pour la suite des opérations. Ce robot a 4 degrés de libertés (X, Y, Z, θ_z).

La cinématique du robot est montrée à la Figure 81. Il s'agit d'un robot hybride. Les deux premiers moteurs actionnent une base pivotante qui peut se déplacer en rotation et en translation verticale. Sur cette base sont fixés deux bras. Le premier est actif (moteur M3) et permet de déplacer le préhenseur (changement de rayon du robot).

Simultanément il sert à transporter le conduit de vacuum au préhenseur. Le deuxième bras est passif et permet d'orienter le préhenseur au moyen d'une courroie (moteur M4).

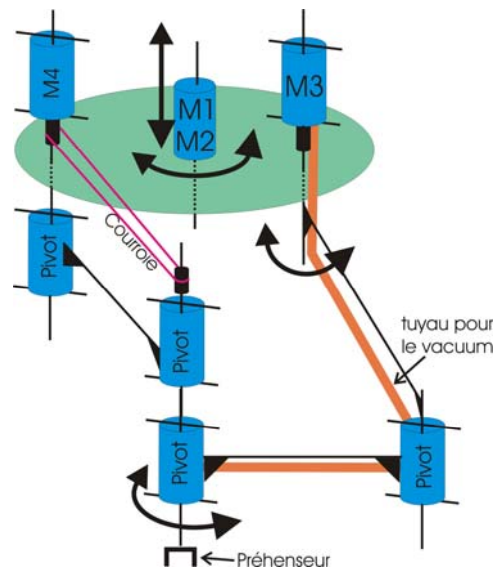


Figure 81 : Cinématique du robot "pocket SCARA"

Les détails de sa disposition et de son fonctionnement sont montrés sur les figures 82 et 83.

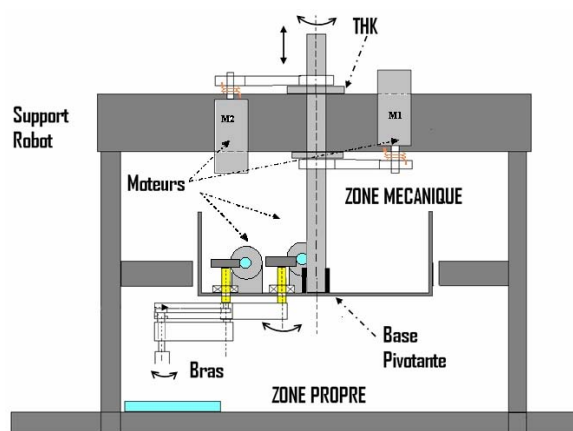


Figure 82: Principe de fonctionnement du robot de la microfactory

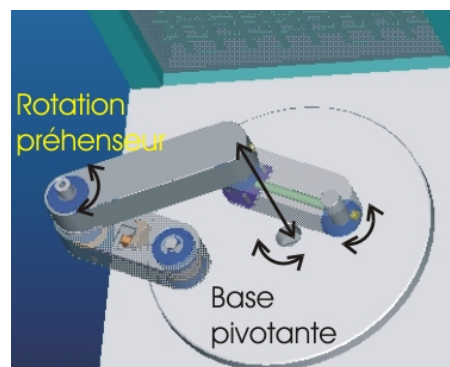


Figure 83: Vue de dessous du robot

Les deux premiers degrés de liberté du robot sont réalisés à l'aide d'une vis THK. Cette vis a la particularité d'avoir deux filets, un hélicoïdal et un longitudinal. Ainsi, en actionnant l'un ou les deux écrous de la vis, elle effectue une rotation, une translation ou une combinaison de ces deux mouvements. Cette vis THK fait la première rotation (M1) et le mouvement vertical (M2).



Figure 84: Vis THK

L'intégration des deux derniers moteurs (M3 et M4) dans la base pivotante permet de séparer la zone propre de la partie où se trouvent les moteurs et autres parties mécaniques du robot, susceptibles de générer des microparticules.

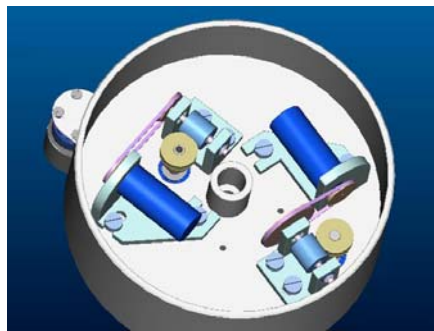


Figure 85: Vue de dessus de la base pivotante du robot

Le robot est démontable du microbox. Ainsi, en cas de panne, le robot peut être enlevé pour être réparé. Pour garantir la répétitivité de positionnement du robot, il repose sur 3 billes grâce à une disposition point – trait – plan.

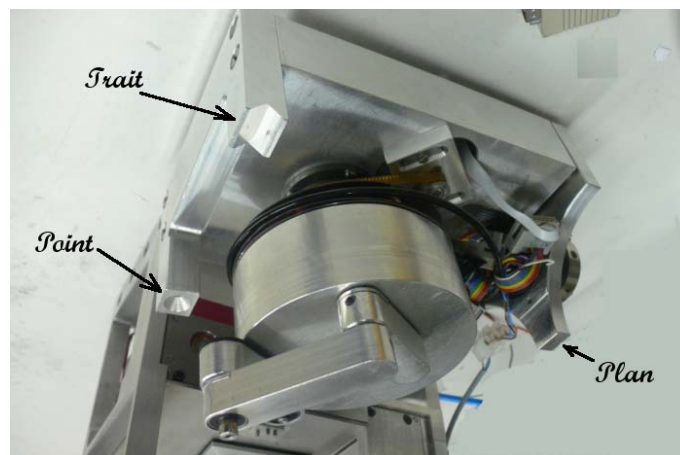


Figure 86: Les trois points d'appui du robot

5.2.4. Le robot « PocketDelta »

Un autre robot qui répond aux exigences de la microfactory a été développé à l'Ecole d'Ingénieurs de Bienne (HTI) avec le support du CSEM [52], [53]. Ce projet était le travail de diplôme de M. Sébastien Perroud, sous la direction du Professeur Mussard et du Docteur Codourey.



Figure 87: Le Pocket Delta

C'est un robot type Delta [54], [55]. Son encombrement est de 120 x 120 x 120 mm³ et il dispose de 3 degrés de liberté (x, y, z), plus un 4^{ème} axe optionnel pour le θ_z . Son volume de travail est un cylindre de 60 mm de diamètre et 30 mm de hauteur.

Comme tout robot parallèle, il a une faible inertie, ce que lui permet d'avoir une accélération supérieure à 100 m/s². Sa cadence est de 3 cycles/s, avec une répétitivité de 2 μ m.

Son volume de travail a un diamètre inférieur à la largeur du microbox, il a donc besoin d'un système de convoyage pour déplacer les pièces vers les microboxes voisins.

5.2.5. Le système d'entrée et de sortie des composants

Le but de ce prototype est de pouvoir procéder à un assemblage nécessitant un environnement propre, tout en travaillant dans une salle d'environnement ordinaire.

Le premier problème à résoudre a donc été d'introduire des composants propres dans ce mini environnement propre en passant par un environnement normal, sans contaminer les composants. L'idée de la solution proposée provient du système standard des salles blanches : Ce système, appelé SMIF (Standard Mechanical InterFace) [56], [57] et son système d'ouverture FOUP (Front Opening Unified Pod), est utilisé pour l'introduction d'une cassette de wafers dans la salle blanche. Comme montré à la Figure 88, le SMIF (20) contenant une cassette de wafers (80) est posé sur la porte de la salle blanche (60). Un mécanisme permet d'accoupler l'ouverture de la salle blanche à celle du SMIF. Comme ces deux parties (60 et 100) couvrent mutuellement les surfaces « polluées » de leurs portes, elles empêchent les microparticules de se propager dans les ambiances propres. Ensuite cet ensemble de portes accouplées est retiré verticalement

pour permettre aux wafers d'être introduits dans l'environnement propre (10) sans être contaminés.

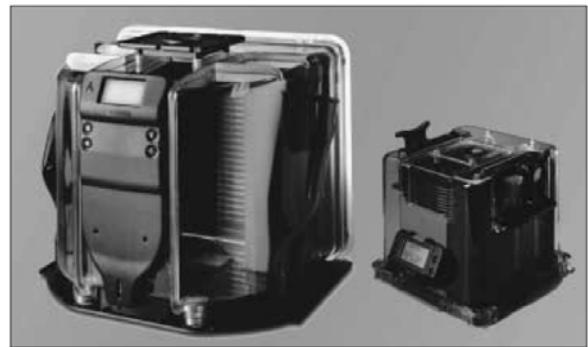
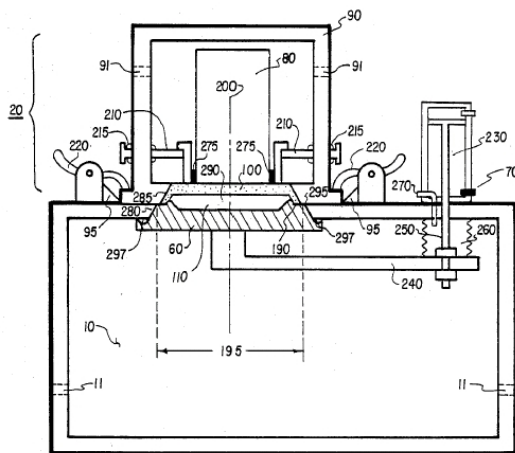


Figure 88:Le principe de l'ouverture du SMIF ainsi qu'une photo d'un SMIF (à droite)

Notre système est semblable au principe du système précédent. Il permet d'introduire dans chaque microbox des palettes qui contiennent des composants propres, sans entraîner leur contamination [58]. Ce principe est montré à la Figure 89.

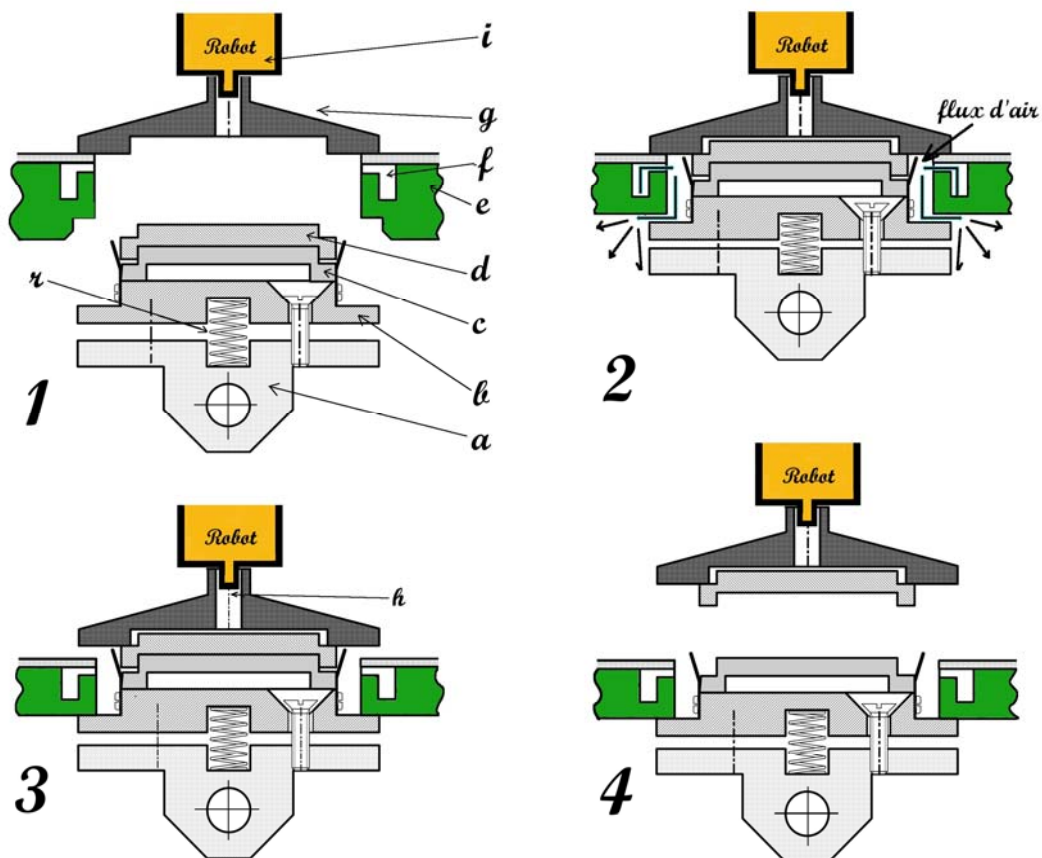


Figure 89:Fonctionnement du système d'entrée des palettes

L'introduction de la palette se fait en 4 phases :

Phase 1 : initiale : La palette (**c+d**) est placée par un opérateur (ou éventuellement un robot externe à la microfactory) sur le support de la palette (**a+b**). Ce support est divisé en deux parties (**a** et **b**), qui peuvent se déplacer l'une par rapport à l'autre grâce à un système comportant un ressort (**r**) et trois vis. Ce mouvement relatif permet à ce système de s'auto-aligner par rapport à la porte (**g**) du microbox et à l'ouverture (**e**) du sas.

Phase 2 : "lavage" : La porte du microbox (**g**) est maintenue sur place par l'appui du robot (**i**). La commande du système place (**a+b**) à leur position sous le sas et fait appuyer la palette (**c+d**) contre la porte du sas du microbox (**g**) : Ainsi le ressort (**r**) se comprime. Le dimensionnement de la porte (**g**), de l'ouverture (**e**) et du support (**b**) sont tels qu'il reste un espace entre (**b**) et (**e**). Un flux d'air propre sortant de (**f**) expulse les microparticules qui se trouvent aux bords de (**c**), (**d**) ou (**e**). Les microparticules qui restent accrochées après "lavage" à ces bords ne posent pas de problème : elles continueront à y rester accrochées pendant le fonctionnement normal.

Phase 3 : soulèvement du couvercle : Le robot (**i**) saisit par vacuum la porte (**g**) de la microfactory et commence à la soulever. Cette porte (**g**) comporte un trou (**h**) traversant, obstrué par un micro filtre. A travers ce filtre, le vacuum aspire en même temps la porte (**g**) et le couvercle (**d**). Comme ils se soulèvent, le ressort (**r**) sous le support de la palette s'allonge, fermant ainsi hermétiquement l'espace qui existait entre le microbox (**e**) et le support (**b**).

Phase 4 : ouverture : Le robot (**i**) continue à déplacer la porte (**g**) et le couvercle (**d**) de la palette et les dépose à l'endroit prévu. Les composants de la palette sont maintenant accessibles par le robot dans l'environnement propre du microbox.

Durant la phase de chargement de la palette, le système du support de la palette décrit un demi cercle tout en restant parallèle à lui-même, comme on peut le voir sur la vue de coté de la Figure 73, grâce à une courroie.

5.2.6. La commande du robot

La commande du robot est basée sur un PC industriel équipé de cartes périphériques simples. Le logiciel a été développé au CSEM sur la base d'un Framework robotique développé en Java [59].

Une interface graphique permet de commander le robot à l'aide d'un ordinateur [60]. Cette interface programmée en Java est montrée à la Figure 90.

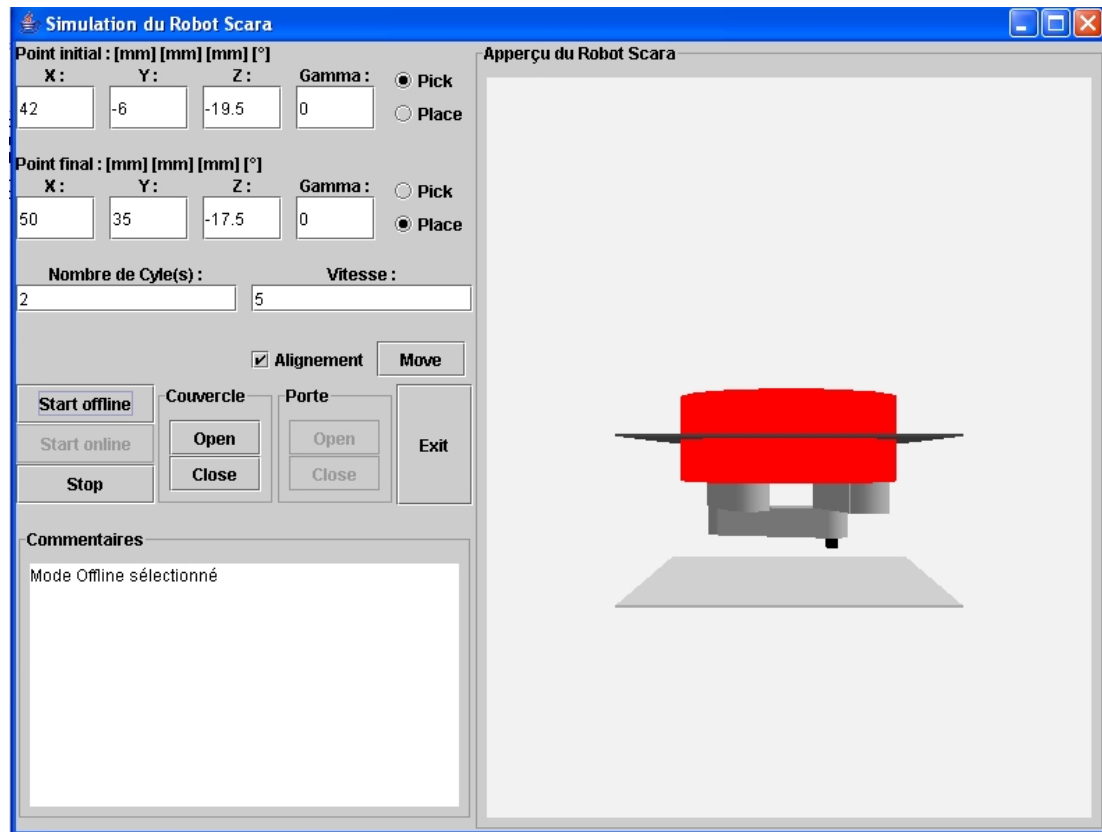


Figure 90: L'interface graphique pour le robot de la microfactory

L'interface graphique est composée de 4 parties :

- Dans la partie de droite une animation graphique montre la position actuelle du robot.
- La partie supérieure gauche permet à l'utilisateur de définir le point de départ, le point d'arrivée, le nombre de composants à saisir et la vitesse du robot. Pour chaque point on définit s'il faut prendre ou poser le composant (pick or place).
- Les boutons qui se trouvent au milieu de la partie de gauche, permettent de choisir le mode de fonctionnement de l'interface et d'exécuter certaines tâches élémentaires, qui seront expliquées en détail par la suite.
- La partie inférieure gauche est réservée à un champ nommé « commentaires ». Dans ce champ, le programme de l'interface informe l'utilisateur de la tâche qu'il est en train d'exécuter.

Cette interface possède deux modes de fonctionnement : *Online* et *Offline* :

Dans le mode *Offline*, il est possible de présenter une simulation du mouvement que le robot va effectuer, le robot réel restant immobile. Cela permet de vérifier que les trajectoires programmées du robot ne provoquent pas de collision.

Dans le mode *Online*, le programme envoie les ordres à la commande du robot qui effectue les opérations demandées. Durant le trajet, le robot envoie au programme une « confirmation » de ses positions. Durant ce mode, la présentation graphique du robot est active, actualisée par les « confirmations » reçues.

Les tâches élémentaires d'ouverture/fermeture de la porte du sas ou d'ouverture/fermeture du couvercle de la palette sont exécutées par simple pression sur les boutons.

Avant de commencer un mouvement, il est possible de choisir l'option « Alignement ». Cette option indique au robot d'appuyer horizontalement chaque composant contre un référentiel formé de 3 butées (voir vue de dessus de la Figure 73). Cela permet de référencer précisément chaque composant par rapport au robot. Les alvéoles des palettes laissent un petit jeu de déplacement aux composants ; ainsi en saisissant un composant avec le robot, ce dernier n'est pas référencé parfaitement, d'où la nécessité de cet alignement.

5.3. Conclusions

Dans ce chapitre plusieurs concepts de configuration possible du microbox ou de la microfactory ont été présentés.

Le module d'un de ces concepts avec un volume de travail de $0,7 \text{ dm}^3$ a été réalisé avec succès.

Ce concept de microbox filtre l'air comprimé pour générer l'environnement propre. Les tests de propreté et de laminarité du flux ont été présentés dans le §4.4 et démontrent que la propreté de ce petit volume de travail pendant le fonctionnement du robot est compatible avec une salle blanche de classe de propreté 10 (ISO4).

Un système de chargement/déchargement des palettes permet d'introduire des palettes qui contiennent des composants propres et hermétiquement enfermés, sans les contaminer. Un système de « lavage » de la palette à l'air comprimé filtré permet d'évacuer les microparticules qui se trouvent sur le rebord extérieur de la palette.

Deux robots ont été développés pour satisfaire les besoins de ce microbox. Leur encombrement est optimisé par rapport aux exigences du prototype. Le premier du type SCARA hybride, a été réalisé dans le cadre de cette thèse au LSRO à l'EPFL, tandis que le deuxième, un petit Delta, a été réalisé par l'équipe de l'Ecole d'Ingénieurs de Bienne avec le support du CSEM ; la description succincte de ce robot a été intégrée dans ce document pour illustrer une autre possibilité de robot d'assemblage.

Une interface permet de commander aisément le robot et de programmer des tâches d'assemblage.

Chapitre 6. Conclusions

L'avancement technologique a permis la miniaturisation des composants électroniques et électromécaniques pour pouvoir offrir des produits multifonctionnels et compacts. Cette miniaturisation des composants n'est généralement pas appliquée aux machines de production et aux chaînes d'assemblage qui restent disproportionnées en regard de la taille des composants qu'elles produisent.

Cette constatation reste valable aussi dans le domaine du semiconducteur et des composants MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). Ainsi les microchips sont produits dans des grandes salles blanches qui occupent deux à trois étages de plusieurs centaines des mètres carrés. Cela entraîne des grands coûts d'installation et d'exploitation, sans compter le délai de construction qui est important.

L'environnement de ces grandes salles blanches doit être compatible avec le personnel qui y travaille (teneur en oxygène, humidité, etc.). Ces personnes représentent le facteur principal de pollution. C'est pour cette raison qu'elles doivent être équipées de vêtements spéciaux, de gants, de lunettes et de masques.

Une solution à ce problème est le concept de la microfactory. Depuis les années '90, plusieurs équipes dans le monde travaillent sur ce concept. C'est un effort de miniaturisation des machines de production. Cela permet de diminuer drastiquement l'inertie des masses à déplacer, l'énergie nécessaire pour l'exploitation du système et d'économiser l'espace. A cela s'ajoute le fait qu'un système miniaturisé est plus facilement transportable.

Les minienvironnements sont des salles blanches miniaturisées. Ils sont utilisés pour le stockage ou l'assemblage des pièces. Les minienvironnements connus par la littérature ou observés lors des expositions ou conférences montrent l'intérêt que suscite la diminution de la taille des salles blanches. Les exemples industrialisés restent encore assez grands avec des encombrements extérieurs de l'ordre de 165mm x 310 mm x 600 mm pour chaque module. Ces dimensions se réfèrent aux dimensions du module de la DTF qui est développée par un consortium au Japon [36]. C'est à notre connaissance la plus petite chaîne d'assemblage avec environnement propre industrialisée actuellement.

Ce travail de thèse est une contribution à l'essor de ce concept de microfactory à environnement propre et constitue une base pour des développements futurs académiques et industriels. Il pousse encore plus à la miniaturisation de l'environnement propre.

La miniaturisation du volume à nettoyer permet de garantir plus facilement un environnement propre avec un flux laminaire et homogène sur toute la section du volume de travail. Le temps de mise en condition de ce volume est très court.

La miniaturisation du volume global est possible grâce à un système de filtration de l'air comprimé. Utiliser les filtres conventionnels des salles blanches (filtres HEPA), ne permet malheureusement pas d'avoir un système assez compact. L'air comprimé et filtré est utilisé pour plusieurs modules en parallèle.

Dans le concept proposé, la chaîne de production est divisée en modules indépendants les uns des autres. Cela permet une reconfiguration rapide de la chaîne de production. En cas de panne d'un module, il est facile de le remplacer par un module de réserve. Le transport des composants entre les modules s'effectue par des robots manipulateurs à l'intérieur de l'environnement propre, ce qui dispense d'utiliser un autre

système de transport : les composants restent toujours dans l'environnement propre ce qui réduit le risque de contamination.

L'entrée des composants dans chaque module se fait par palettes. Un système de sas actif protège les composants des microparticules lors de l'introduction de la palette.

6.1. Contributions

Les contributions originales de cette thèse peuvent se résumer comme suit :

- Mise au point d'une méthodologie qui permet de concevoir rapidement une chaîne d'assemblage miniature adaptée au produit demandé ; cette démarche a été informatisée.
- Proposition de plusieurs concepts d'une chaîne de production miniature et modulaire. Un de ces concepts a été réalisé et caractérisé. Son petit volume d'encombrement rend cette chaîne de production transportable et sa reconfiguration est aisée. Son coût d'exploitation est modéré par rapport à celui d'une salle blanche standard.
- Etablissement d'une technique qui permet de générer un environnement propre sans recourir à une salle blanche standard. Cette technique utilise l'air comprimé du réseau de l'usine, ce qui la rend facilement adaptable au cadre industriel. Le volume de travail testé est de $0,7 \text{ dm}^3$.
- Conception, dimensionnement et optimisation d'un dispositif qui transforme l'air comprimé, cité précédemment, en flux laminaire dans un espace minimum. Des mesures en conditions proches de la réalité industrielle ont confirmé son efficacité.
- Conception, réalisation et caractérisation d'un système pour l'introduction dans l'environnement propre d'un microbox, des composants propres sans les contaminer. Ces composants sont transportés dans des palettes adéquates, correspondant à un standard industriel.
- Conception d'un robot hybride, ainsi que son interface de commande qui permettent d'introduire, de déplacer et de positionner des composants dans le microbox dans le but de les assembler.

La méthodologie permet de définir la dimension optimale de l'installation, en rapport avec la taille du produit à fabriquer. Elle permet également de choisir au sein d'une base de données les machines qui sont les mieux adaptées à l'application demandée.

La méthodologie est valable pour toutes les applications indépendamment de la nécessité de travailler dans un environnement propre. Il est possible de remplacer l'air comprimé, actuellement utilisé, par n'importe quel autre gaz comprimé (et non polluant, par exemple azote, hélium etc.), si l'application le requiert.

6.2. Améliorations et mesures prévues

Le prototype réalisé au cours de cette thèse a permis de démontrer la faisabilité du concept proposé. Néanmoins il reste encore de nombreuses améliorations à effectuer.

Notamment :

- Pour compléter le prototype actuel, il est nécessaire d'intégrer un système de vision. Cela permettra de contrôler des mouvements du robot et vérifier la présence et la saisie des composants.
- Mesures de la propreté : Pour tester la propreté d'un dispositif comme la microfactory, nous pouvons, soit mesurer la qualité de l'air (c'est le système déjà utilisé pour prouver l'efficacité de notre système), soit poser à l'intérieur un objet et décompter le nombre de particules qui s'y sont déposées. La façon la plus simple de réaliser cette deuxième mesure est de placer comme témoin un wafer. Il existe en effet des appareils qui peuvent compter et cartographier le nombre et la taille des microparticules qui s'y sont déposées. Les mesures de propreté effectuées, mesurant la qualité de l'air durant les mouvements du robot et la phase d'introduction de la palette, ont montré que notre système est compatible avec la classe de propreté 10. Cela nous incite à penser que le décompte des particules sur le wafer confirmera ces mesures.
 - ↳ Ainsi, pour connaître l'influence du robot sur la propreté, il suffit d'introduire dans le microbox un wafer pendant que le système de filtration de l'air est en marche. En faisant fonctionner le robot au-dessus du wafer pendant un certain temps et en mesurant par la suite le nombre des microparticules qui s'y sont déposées, on pourra définir l'efficacité du système et l'influence du robot.
 - ↳ La mesure de l'efficacité du système d'introduction des palettes est plus délicate, car il n'existe pas de wafers aussi petits que les palettes. Ainsi, au lieu de wafers, on utilisera des composants. En observant leur propreté avant et après l'introduction de la palette, on déterminera la propreté du système d'introduction des palettes et rendre le programme plus flexible.
- Améliorer le programme de la méthodologie : Faciliter le changement de l'ordre des opérations. Actuellement, cela n'est pas possible et si nous voulons le faire, il faut effacer les opérations pour les réécrire dans l'ordre voulu. Il est aussi possible d'améliorer l'interface du programme pour pouvoir prendre en compte des spécificités des robots, machines ou palettes.
- Offrir la possibilité dans le programme de la méthodologie d'intégrer plus de 4 appareils par microbox. Le programme actuel est limité arbitrairement à ce chiffre, car notre but était la démonstration de la validité de cette méthode plutôt que la capacité d'intégrer toutes les applications possibles.

Les mesures proposées permettront de tester les performances du système dans le but d'améliorer le prochain prototype. Il sera axé davantage sur une application industrielle pour voir les difficultés que l'on rencontrera dans la réalité lors d'une production effective.

6.3. Perspectives

Ce projet a permis de poser les bases dans le domaine de recherche au sujet de la microfactory. Les idées proposées ci-dessous donnent des voies possibles pour la suite des recherches utiles au développement de la microfactory :

- Le microbox réalisé n'est qu'une partie modulaire de la microfactory. Il serait intéressant de construire une microfactory intégrale avec le nombre de modules nécessaires. Cela permettrait de réaliser toute la chaîne d'assemblage complète d'un produit et de la tester. Ceci doit se faire en partenariat avec un industriel.
- Dans ce prototype seulement un robot a été intégré dans le microbox. Dans le futur il serait souhaitable de regarder de plus près l'intégration de plusieurs machines et robots de plus haute précision. Afin d'avoir un espace propre le plus petit possible, il est proposé d'insérer dans la microfactory seulement les *end effectors* de ces machines et de ces robots [49]. Cela présente l'avantage de garder leurs parties qui génèrent les microparticules à l'extérieur de la partie sensible.
- La proposition d'intégrer un convoyeur semble favorable à certaines conditions comme il a été discuté au §3.8.2 (p. 48). Il faut que le convoyeur soit compatible avec un environnement propre, et que son emplacement soit dans une position stratégique pour optimiser le temps de transfert des composants. La réalisation d'un module intégrant un convoyeur peut mettre en évidence les avantages ou les difficultés de ce concept.
- La partie graphique du programme de la méthodologie est élémentaire. Elle aide le concepteur à se souvenir de l'emplacement des machines grâce à un schéma, (voir Figure 20). Ce dessin est indicatif et statique. Actuellement c'est au concepteur d'imaginer l'emplacement des machines. Si ce schéma était actualisé au fur et à mesure que l'utilisateur ajoute des machines dans le microbox, cela l'aiderait à visualiser mieux les séquences de l'assemblage.
- Tester les autres concepts : Parmi les concepts proposés, un seul a été réalisé. Un domaine futur est d'en réaliser plusieurs, dans le but de les comparer pour trouver celui qui soit en même temps le plus pratique, le plus fiable et le plus économique. Le concept qui utilise la table rotative serait un autre concept réalisable et prometteur, car la partie qui concerne la propreté et la modularité est identique au concept du microbox qui a déjà été testé. Le mouvement de la table résout le problème de transfert des composants entre les microboxes.
- Une simulation de l'homogénéisateur du flux en 3D permettra de trouver une solution encore plus compacte. La solution trouvée ici satisfait les objectifs visés, mais nous ne connaissons pas les limites de cette méthode et ne savons pas s'il serait possible de rendre l'homogénéisateur encore plus compact.
- Simuler l'influence du robot et des machines utilisées dans le flux laminaire du microbox. Cela permettra de connaître l'importance de leur influence afin de la minimiser.
- Dans le futur il serait souhaitable de commencer le design de la microfactory dès le design du produit. On pourrait ainsi s'imaginer que l'ingénieur qui fait la conception du produit, examine en même temps la configuration de la microfactory nécessaire pour le réaliser. Cela lui donnera la possibilité d'adopter directement la méthode d'assemblage susceptible d'améliorer la cadence de production ou le coût total de l'installation. Bien que cette proposition demande de grands investissements en termes de programmation, elle devrait être envisagée vu les possibilités qu'offre le progrès technologique actuel.

Annexes

A 1. Application industrielle

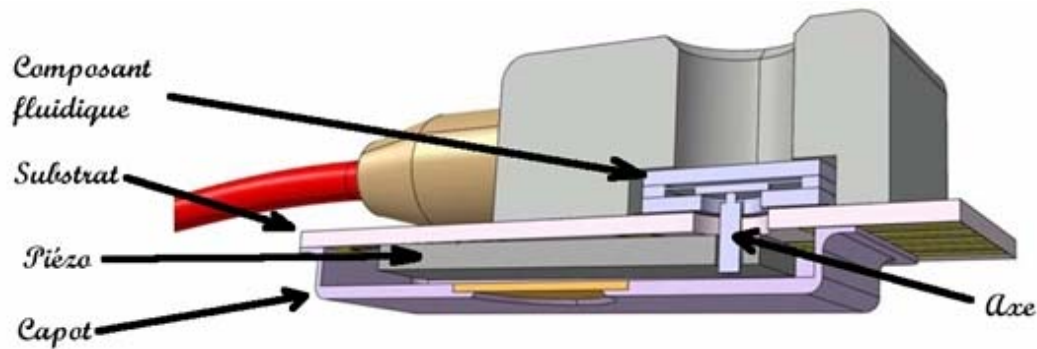


Figure A91 : Le microcomposant dont le montage est utilisé comme application pratique pour la méthodologie

Pour démontrer l'utilité de cette méthodologie, elle a été appliquée à une fabrication industrielle. C'est le montage d'un micro - composant en silicium. Sa petite taille impose un montage en environnement propre pour éviter que des microparticules s'y insèrent et entravent son fonctionnement.

Le corps principal est composé de cinq pièces, montrées à la Figure A91. Le tout est monté sur un substrat plus grand, de 10x15 mm. L'ordre et les opérations à faire pour le montage sont décrites à la Figure A92.

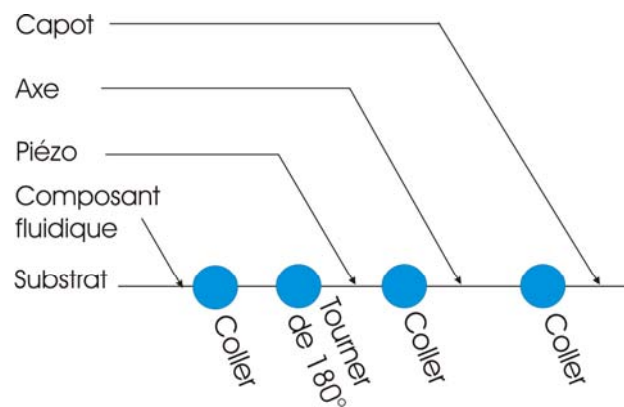


Figure A92: Ordre de montage de la micro pompe

La table suivante montre les dimensions de ces composants :

Nom	Dimensions [mm]
Substrat céramique	10 x 15 x 1
Composant fluide	2 x 3 x 0,5
Axe	∅1 x 3
Piézoélectrique	4 x 8 x 0,5
capot	7 x 10 x 2

A titre d'exemple nous avons considéré deux robots pour faire les transports dans les microboxes. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

Robot	Volume de travail (H x L x l) [mm ³]	Vitesse maximale [mm/s]	Accélération maximale [m/s ²]	Prix [CHF]
Robot 1	50 x 200 x 250	100	10	10.000
Robot 2	60 x 150 x 150	150	20	30.000

La base de données met à disposition 6 types de palettes (2", 4", 5", 6", 8", 12").

Pour cet exemple nous avons besoin d'une machine pour réaliser les collages. On a considéré deux machines de collage : une rapide (700 manipulations/h) et une plus lente (500 manipulations/h). Pour chaque composante le programme trouve toutes les combinaisons possibles entre les machines (ici la machine de collage), les palettes et les robots de transfert. Ensuite il contrôle si le robot peut couvrir la zone de travail nécessaire. Si tel est le cas, il calcule le temps et le coût pour chaque opération.

Résultats

Toutes les résultats valables (sont testés: compatibilité opérations, précision, volume de travail du robot)

No	Composant	Palette	Nbre comp	Auton(min)	Temps[s]	Coût[CHF]	Robot	Nom opér	Type opér	Dist[mm]	Durée[s]	Nom opér	Type opér	Dist[mm]	Durée[s]
1	Fluidique	2"	108	55.35	30.75	2.15	robot1	entree_sub pick&place	43.47	4.17	chercher_c pick&place	90.95	6.03		
2	Fluidique	2"	108	110.71	61.50	32.75	robot1	entree_sub pick&place	43.47	4.17	chercher_c pick&place	90.95	6.03		
3	Fluidique	4"	374	230.97	37.05	2.59	robot1	entree_sub pick&place	92.82	6.09	chercher_c pick&place	116.23	6.82		
4	Fluidique	4"	374	461.94	74.11	39.46	robot1	entree_sub pick&place	92.82	6.09	chercher_c pick&place	116.23	6.82		
5	Fluidique	5"	378	251.32	39.89	2.79	robot1	entree_sub pick&place	117.96	6.87	chercher_c pick&place	128.89	7.18		
6	Fluidique	5"	378	502.64	79.78	42.48	robot1	entree_sub pick&place	117.96	6.87	chercher_c pick&place	128.89	7.18		
7	Fluidique	6"	572	404.85	42.47	2.97	robot1	entree_sub pick&place	142.79	7.56	chercher_c pick&place	141.35	7.52		
8	Fluidique	6"	572	809.70	84.93	45.23	robot1	entree_sub pick&place	142.79	7.56	chercher_c pick&place	141.35	7.52		
9	Fluidique	2"	108	39.29	21.83	20.30	robot2	entree_sub pick&place	43.47	2.95	chercher_c pick&place	90.95	4.27		
10	Fluidique	2"	108	78.57	43.65	121.35	robot2	entree_sub pick&place	43.47	2.95	chercher_c pick&place	90.95	4.27		
11	Fluidique	2"	108	55.35	30.75	0.29	scara	entree_sub pick&place	43.47	4.17	chercher_c pick&place	90.95	6.03		
12	Fluidique	2"	108	110.71	61.50	32.75	robot1	entree_sub pick&place	43.47	4.17	chercher_c pick&place	90.95	6.03		

Calculer

Trier par temps

Trier par coût

Figure A93: Solutions possibles pour l'assemblage du premier composant

A la Figure A93 sont montrés les résultats des solutions possibles pour l'assemblage du premier composant (composant fluidique). Pour chaque solution sont montrés d'abord les caractéristiques globales (nom du composant, palette utilisée, nombre des composants par palette, temps d'autonomie de la palette, temps total de l'assemblage de ce composant et le coût correspondant). A la suite sont présentés le nom, le temps et le coût de chaque opération en détail. Figurent d'abord les opérations de transport, puis les opérations d'assemblage (ici collage).

Dans cet exemple le volume de travail du premier robot est plus grand que celui du deuxième, mais le deuxième est plus rapide. Il est à noter que le volume de travail du premier robot permet d'envisager des solutions qui utilisent des palettes plus grandes que celles envisagées avec le deuxième robot. Tandis que le deuxième robot étant plus rapide, il permet de réaliser ces opérations plus vite (avec des palettes d'une taille inférieure).

Calculer

Trier par temps

Trier par coût

Meilleurs résultats triés par rapport au temps d'exécution

No	Composant	Palette	Nbre comp	Auton[min]	Temps[s]	Coût[CHF]	Robot	Nom opér	Type opér	Distance[m]	Durée[s]	Nom opér	Type opér	Distance[m]	Durée[s]
9	Fluidique	2"	108	39.29	21.83	20.30	robot2	entree_sub	pick&place	43.47	2.95	chercher_c	pick&place	90.95	4.27
25	piezo	2"	32	10.33	19.37	17.44	robot2	apporte_ss	pick&place	43.47	2.95	chercher_c	pick&place	70.91	3.77
47	axe	2"	144	44.74	18.64	16.78	robot2	apporter	pick&place	43.47	2.95	chercher_c	pick&place	70.91	3.77
69	capot	2"	15	5.11	20.44	18.39	robot2	apporter	pick&place	43.47	2.95	chercher	pick&place	70.91	3.77

◀

▶

Exit

Figure A94: Meilleures solutions par rapport au temps d'assemblage

En cherchant les meilleures solutions par rapport au temps d'exécution (Figure A94), c'est toujours le deuxième robot qui est proposé, combiné avec la plus petite palette (2" x 2").

Par contre, si nous cherchons la solution la meilleure marché, comme le robot 1 est plus lent, mais d'un prix inférieur, c'est lui qui est proposé pour l'assemblage. (Figure A95).

Calculer

Trier par temps

Trier par coût

Meilleurs résultats triés par rapport au temps d'execution

No	Composant	Palette	Nbre comp	Auton[<div>min</div>]	Temps[<div>s</div>]	Coût[<div>CHF</div>]	Robot	Nom opér	Type opér	Distance[<div>m</div>]	Durée[<div>s</div>]	Nom opér	Type opér	Distance[<div>m</div>]	Durée[<div>s</div>]
11	Fluidique	2"	108	55.35	30.75	0.29	scara	entree_sub	pick&place	43.47	4.17	chercher_c	pick&place	90.95	6.03
No	Composant	Palette	Nbre comp	Auton[<div>min</div>]	Temps[<div>s</div>]	Coût[<div>CHF</div>]	Robot	Nom opér	Type opér	Distance[<div>m</div>]	Durée[<div>s</div>]	Nom opér	Type opér	Distance[<div>m</div>]	Durée[<div>s</div>]
29	piezo	2"	32	14.40	27.01	0.24	scara	apporte_ss	pick&place	43.47	4.17	chercher_c	pick&place	70.91	5.33
No	Composant	Palette	Nbre comp	Auton[<div>min</div>]	Temps[<div>s</div>]	Coût[<div>CHF</div>]	Robot	Nom opér	Type opér	Distance[<div>m</div>]	Durée[<div>s</div>]	Nom opér	Type opér	Distance[<div>m</div>]	Durée[<div>s</div>]
51	axe	2"	144	63.07	26.28	0.23	scara	apporter	pick&place	43.47	4.17	chercher_c	pick&place	70.91	5.33
No	Composant	Palette	Nbre comp	Auton[<div>min</div>]	Temps[<div>s</div>]	Coût[<div>CHF</div>]	Robot	Nom opér	Type opér	Distance[<div>m</div>]	Durée[<div>s</div>]	Nom opér	Type opér	Distance[<div>m</div>]	Durée[<div>s</div>]
73	capot	2"	15	7.02	28.07	0.25	scara	apporter	pick&place	43.47	4.17	chercher	pick&place	70.91	5.33

Exit

Figure A95: Meilleures solutions par rapport au coût de la production

Cette méthodologie est un outil qui aide à la conception de la microfactory. C'est donc au concepteur de décider s'il veut prendre la solution optimale par rapport au temps ou au coût de production, ou encore s'il veut choisir parmi les autres solutions possibles, présentées dans la Figure A93

A 2. Simulations du flux

A la suite sont présentés les résultats des simulations réalisées avec le logiciel Fluent® 2D comme elles ont été introduites au §4.3.3, p.66. En vue des hypothèses posées, ces simulations sont approximatives et ont pour seul but de montrer les tendances du comportement de l'homogénéisateur. Les mesures de la cartographie de la vitesse de l'air se sont avérées beaucoup plus précises et utiles que les simulations.

Pour diminuer les ressources informatiques nécessaires, nous avons simulé la moitié de la coupe de l'homogénéisateur. Pour toutes les simulations les conditions initiales sont les mêmes. Seulement le nombre des grilles varie.

La partie en vert est l'entrée de l'air par une conduite qui était simulée par une conduite suffisamment longue pour avoir une vitesse homogène lors de l'entrée du flux dans l'homogénéisateur (changement de section).

Le volume de l'homogénéisateur est divisé en 6 zones. Pour simuler l'effet d'une grille on définit une porosité à l'interface entre deux zones.

Au milieu de la première grille nous avons simulé une obstruction des trous sur un diamètre de 45 mm.

La Figure A96 montre ces paramètres.

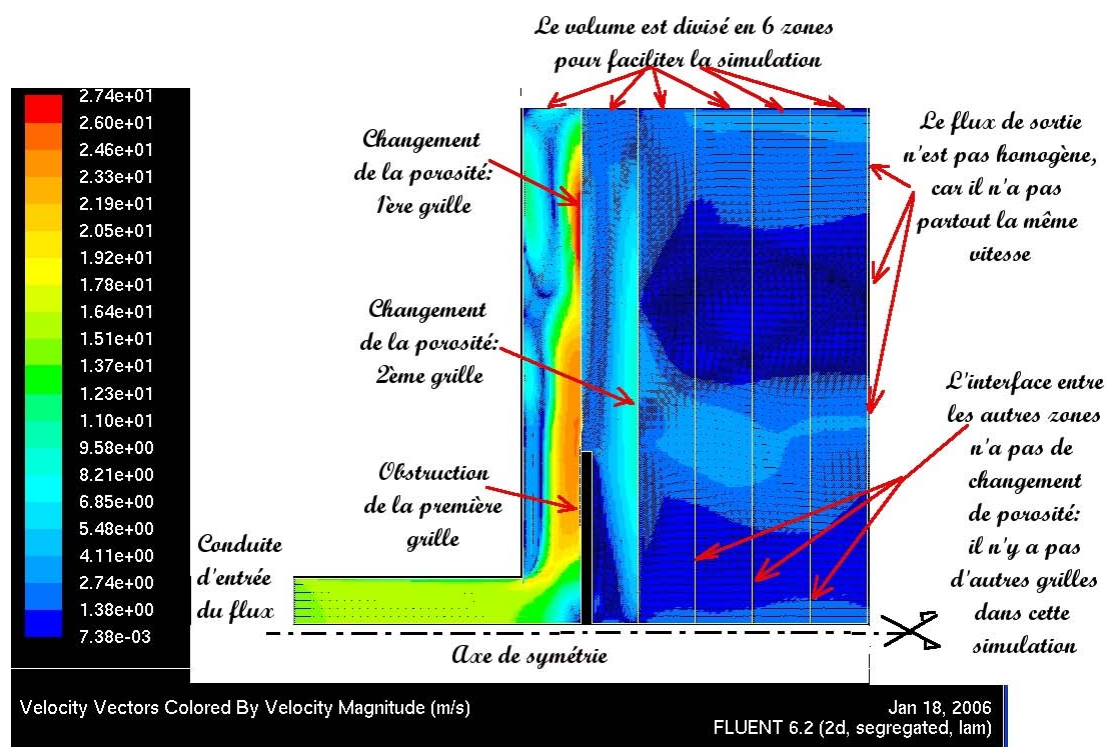


Figure A96: Explications des résultats de la simulation. Ici un exemple avec deux grilles

En simulant une grille, obstruée à son centre, le flux de sortie est inhomogène (Figure A97).

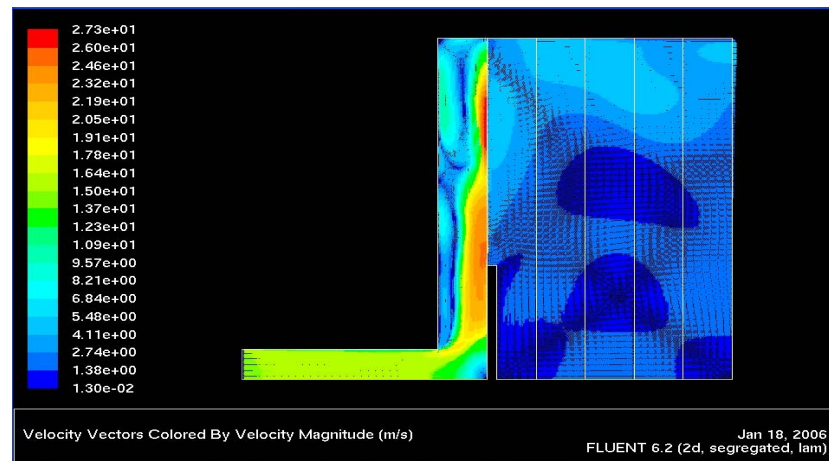


Figure A97: Simulation avec 1 grille

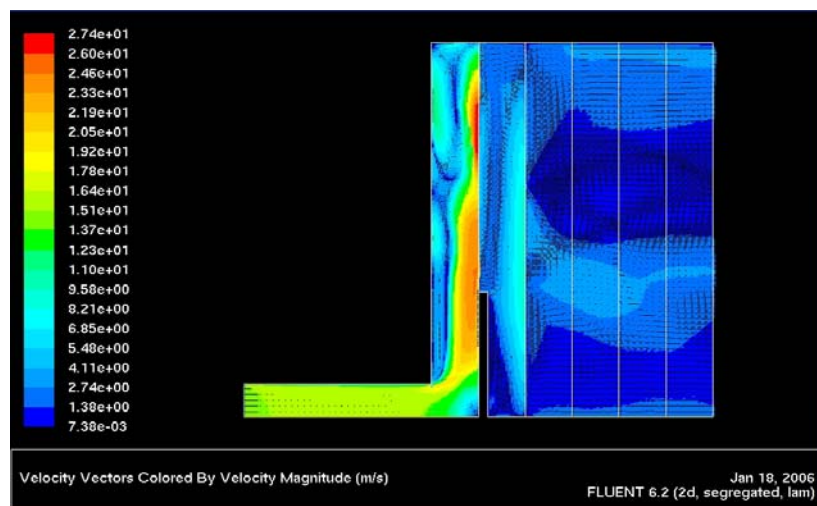


Figure A98: Simulation avec 2 grilles

Une simulation avec 3 grilles montre le que le flux de sortie est plus homogène. Il reste encore certaines irrégularités (Figure A99).

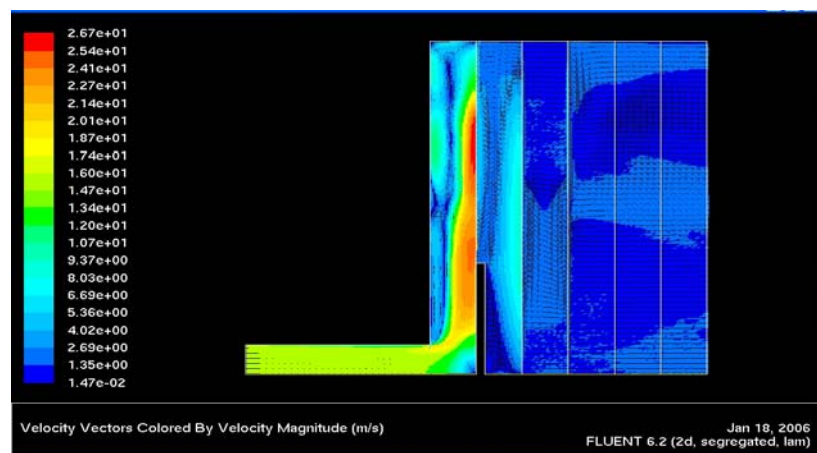


Figure A99: Simulation avec 3 grilles

A2. Simulation du flux

La simulation avec 4 grilles montre que le flux est presque complètement homogène (Figure A100). Cela correspond aussi aux résultats expérimentaux.

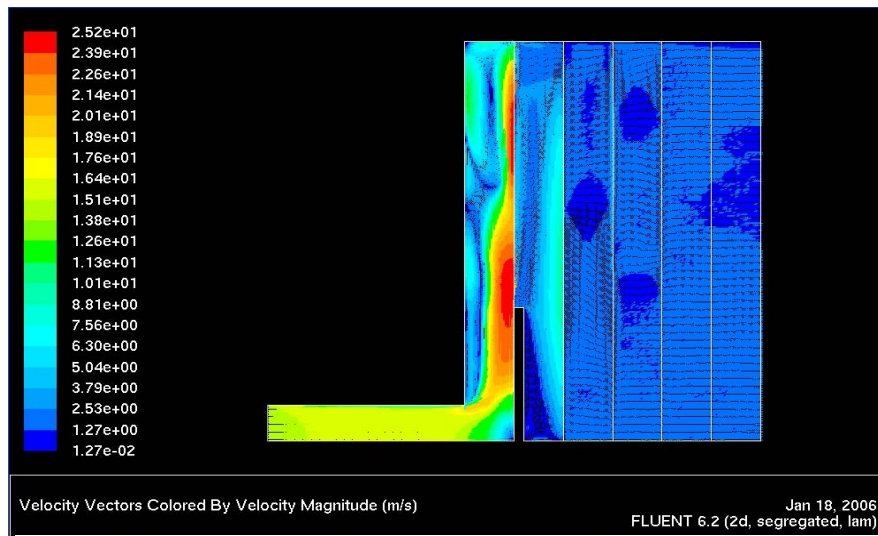


Figure A100: Simulation avec 4 grilles

Dans la simulation avec 5 grilles de grande porosité, la variation de la vitesse à la sortie est très petite (Figure A101).

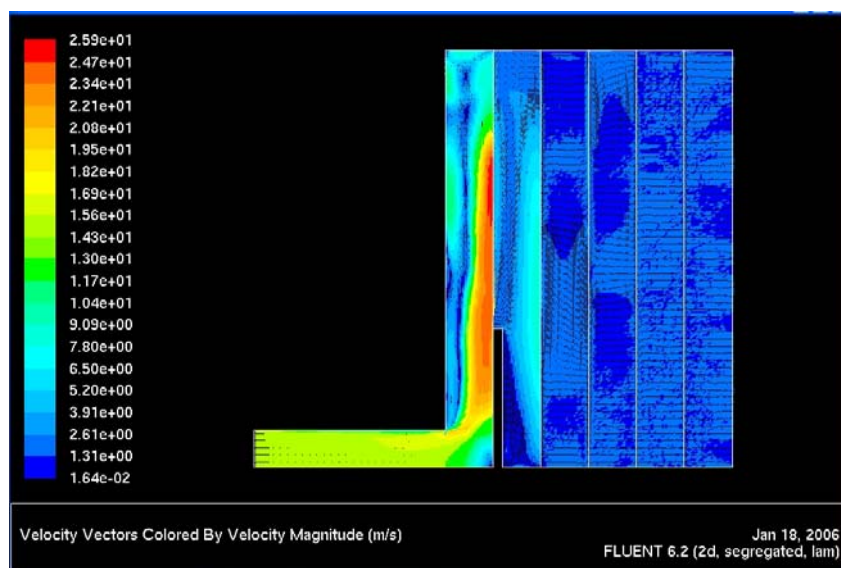


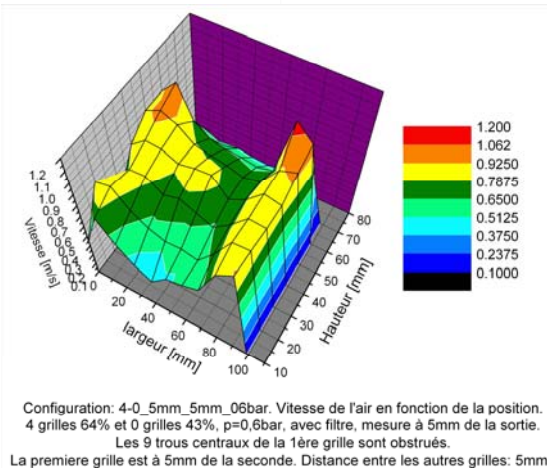
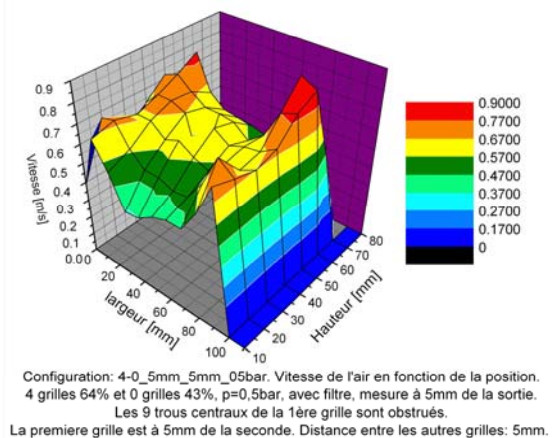
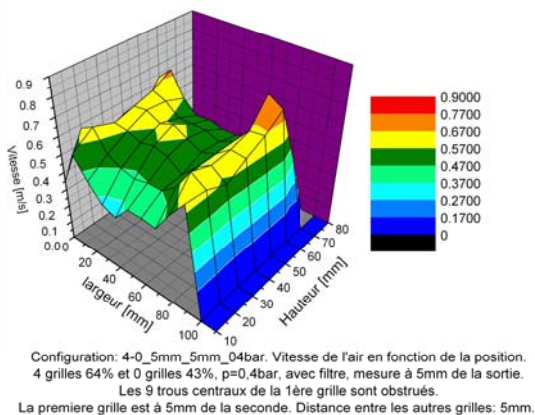
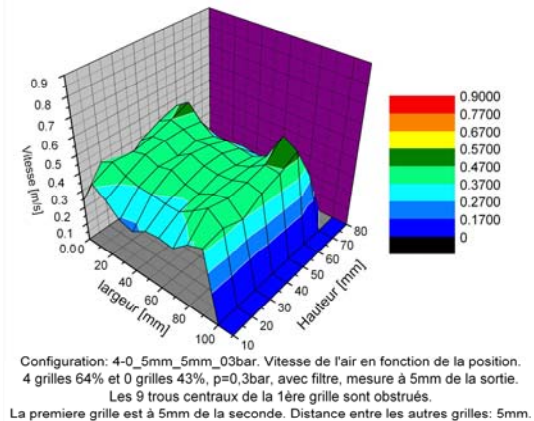
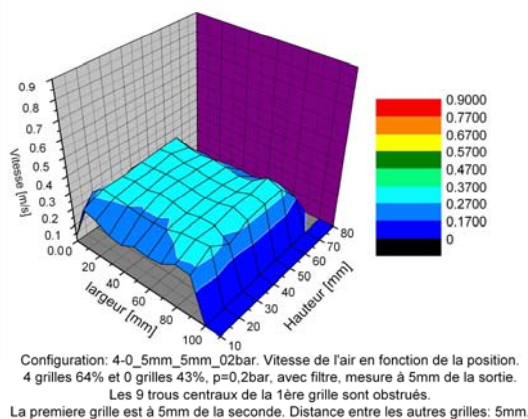
Figure A101: Simulation avec 5 grilles

A 3. Cartographie de l'homogénéisateur

La cartographie de la vitesse de l'air à la sortie de l'homogénéisateur est présentée à la suite. Le résumé de ces mesures est montré dans la Figure 57 et 58.

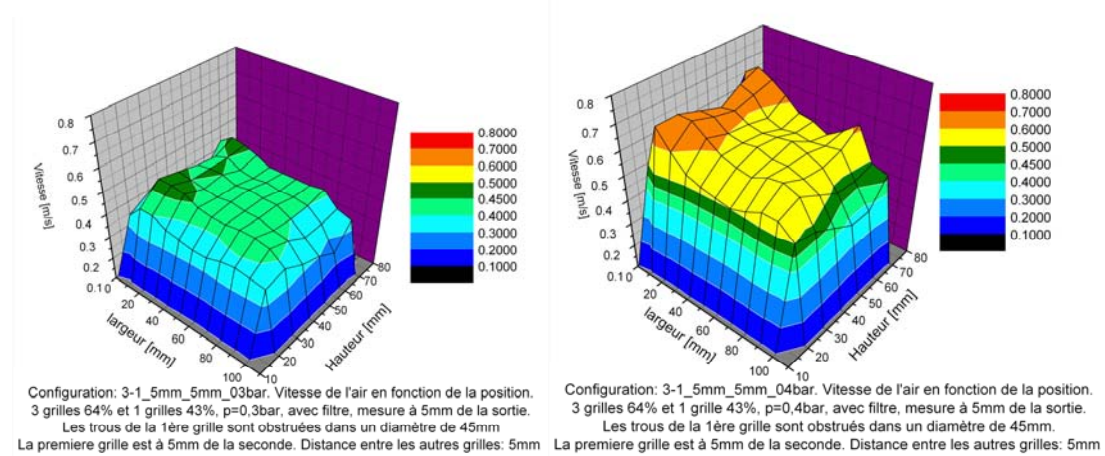
Ces mesures sont présentées par groupes de configuration. Pour chaque configuration les mesures de différentes pressions sont montrées.

Voici les mesures pour la configuration utilisant 4 grilles 64% avec les trous au milieu de la première grille obstrués (configuration 4-0_5mm_5mm):

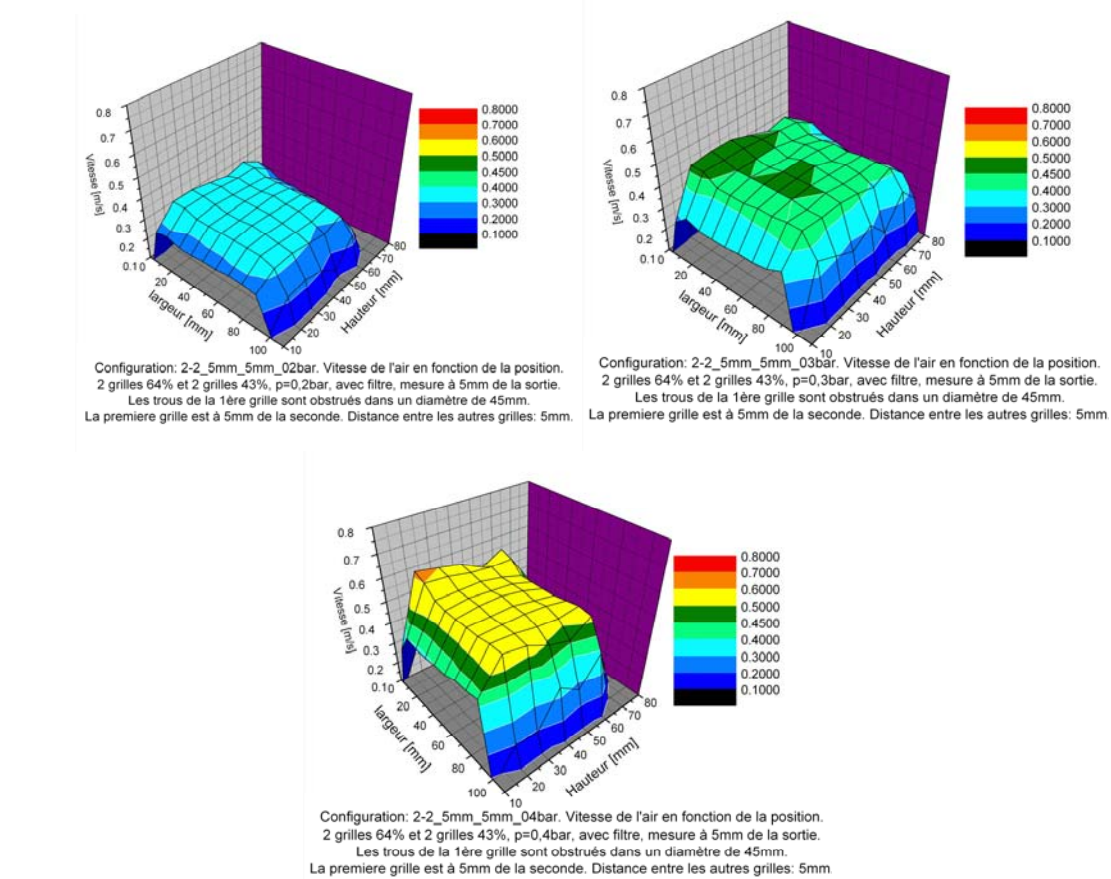


A3. Cartographie de l'homogénéisateur

A la suite sont présentées les mesures de la configuration **3-1_5mm_5mm**, qui utilise 3 grilles 64%, 1 grille 43% avec un espacement de 5 mm entre elles. Les trous de la première grille sont obstrués.

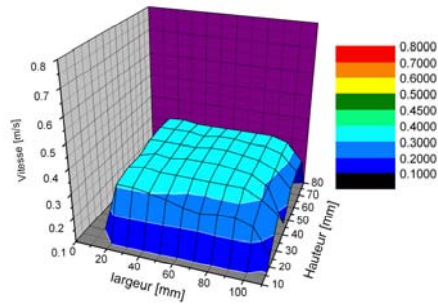


La configuration **2-2_5mm_5mm** utilise 2 grilles 64% et 2 grilles 43% avec un espacement de 5 mm entre elles. Les trous de la première grille sont obstrués.

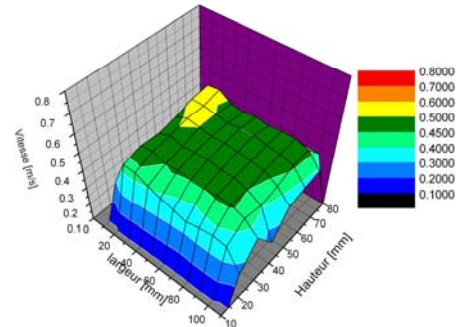


A3. Cartographie de l'homogénéisateur

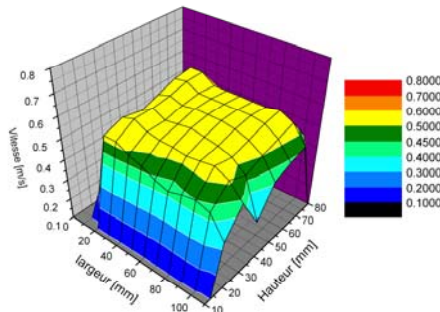
La configuration **0-3_5mm_5mm** utilise 3 *grilles 43%* avec un espacement de 5 mm entre elles. Les trous de la première grille sont obstrués.



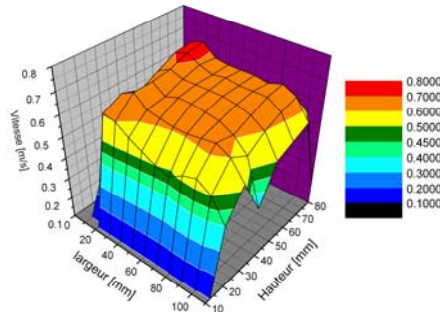
Configuration: 0-3_5mm_5mm_02bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 3 grilles 43%, $p=0,2\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 5mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 5mm



Configuration: 0-3_5mm_5mm_03bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 3 grilles 43%, $p=0,3\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 5mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 5mm

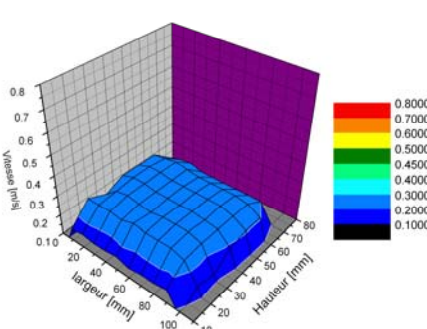


Configuration: 0-3_5mm_5mm_04bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 3 grilles 43%, $p=0,4\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 5mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 5mm

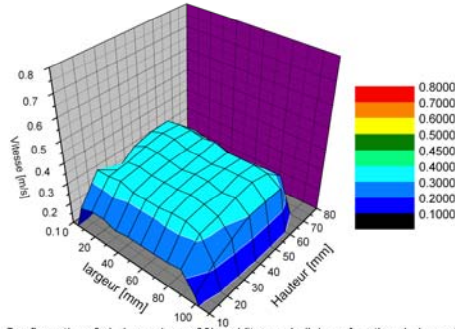


Configuration: 0-3_5mm_5mm_05bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 3 grilles 43%, $p=0,5\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 5mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 5mm

La configuration **0-4_1mm_1mm** utilise 4 *grilles 43%* avec un espacement d'un mm entre elles. Les trous de la première grille sont obstrués.

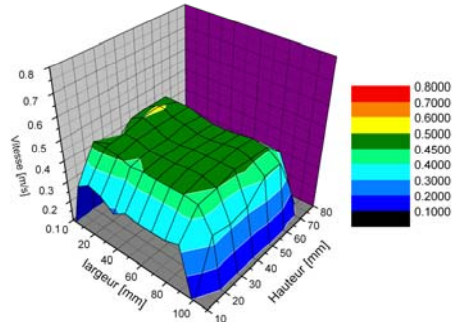


Configuration: 0-4_1mm_1mm_02bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,2\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 1mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 1mm

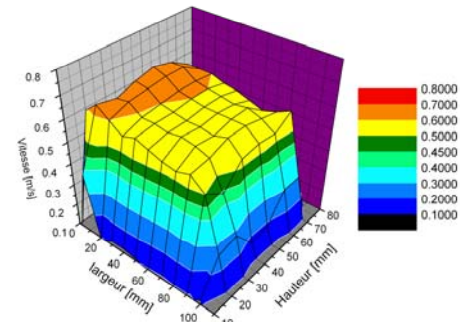


Configuration: 0-4_1mm_1mm_03bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,3\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 1mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 1mm

A3. Cartographie de l'homogénéisateur

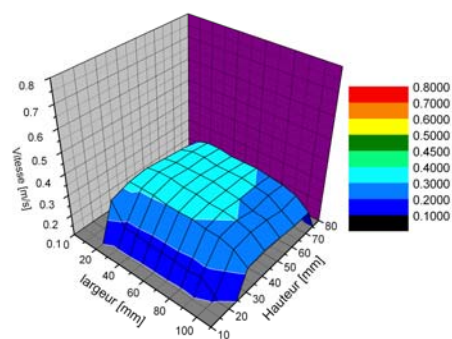


Configuration: 0-4_1mm_1mm_04bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,4$ bar, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 1mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 1mm

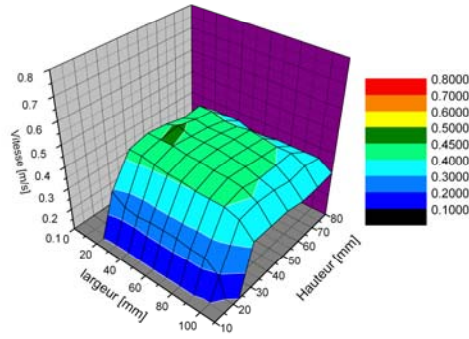


Configuration: 0-4_1mm_1mm_05bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,5$ bar, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 1mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 1mm

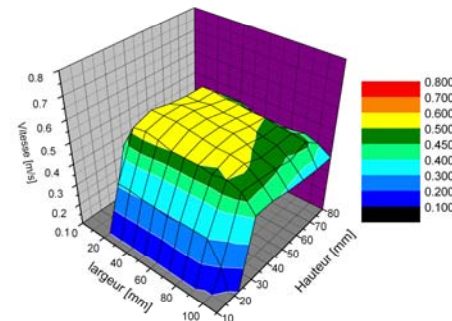
La configuration **0-4_5mm_5mm** utilise aussi 4 grilles 43% mais avec un espacement de 5 mm entre elles. Les trous de la première grille sont obstrués.



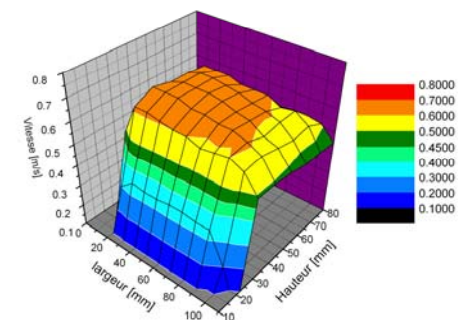
Configuration: 0-4_5mm_5mm_02bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,2$ bar, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 5mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 5mm



Configuration: 0-4_5mm_5mm_03bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,3$ bar, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 5mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 5mm



Configuration: 0-4_5mm_5mm_04bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,4$ bar, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 5mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 5mm

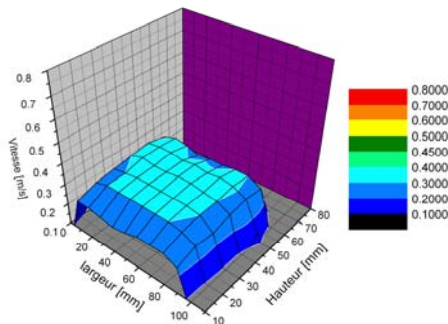


Configuration: 0-4_5mm_5mm_05bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,5$ bar, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 5mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 5mm

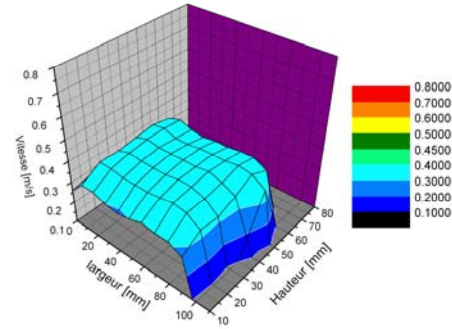
A3. Cartographie de l'homogénéisateur

La configuration **0-4_15mm_1mm** utilise aussi 4 grilles 43% avec un espacement d'un mm entre elles. Les trous de la première grille sont obstrués. Entre la première grille (obstruée) et les autres il y a un espace de 15mm.

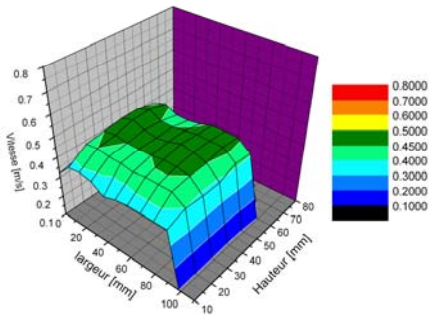
On observe que cet espace entre la première et la deuxième grille aide à homogénéiser le flux. C'est pour cette raison que les configurations suivantes ont cet espacement entre les deux premières grilles.



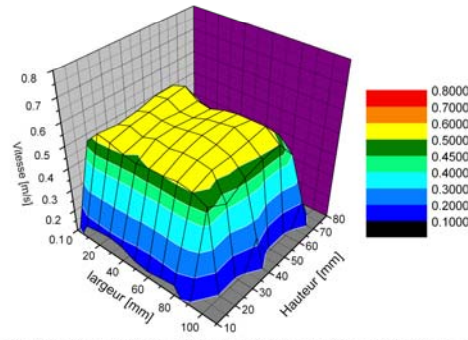
Configuration: 0-4_15mm_1mm_02bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,2\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 1mm



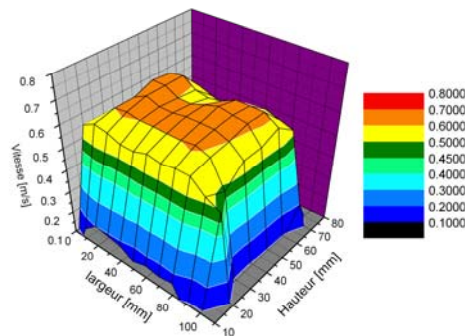
Configuration: 0-4_15mm_1mm_03bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,3\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 1mm



Configuration: 0-4_15mm_1mm_04bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,4\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 1mm



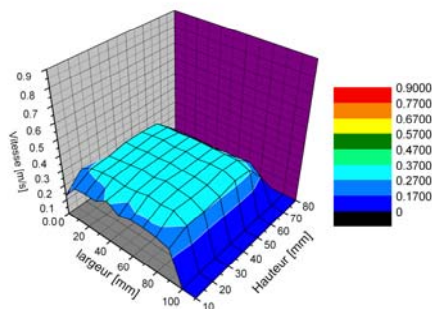
Configuration: 0-4_15mm_1mm_05bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,5\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 1mm



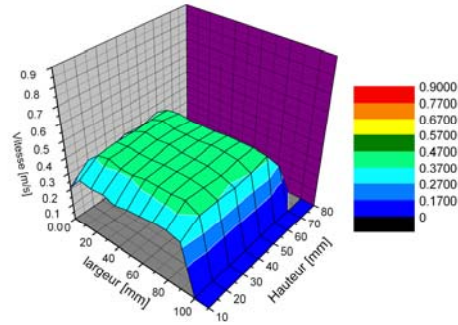
Configuration: 0-4_15mm_1mm_06bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,6\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 1mm

A3. Cartographie de l'homogénéisateur

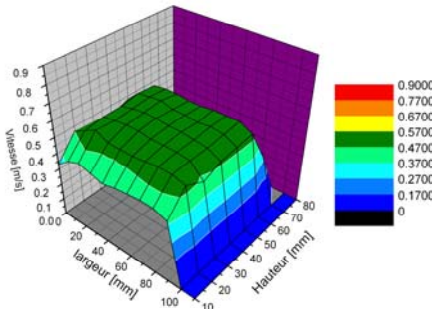
La configuration **0-4_15mm_2mm** utilise aussi 4 *grilles 43%* avec un espacement de deux mm entre elles. Les trous de la première grille sont obstrués. Entre la première grille (obstruée) et les autres il y a un espace de 15mm.



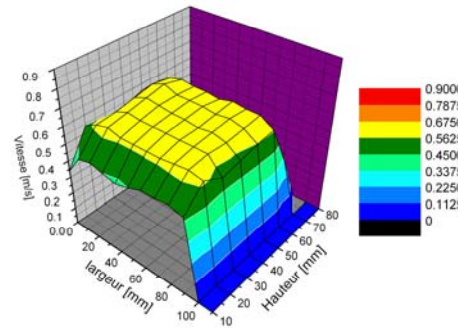
Configuration: 0-4_15mm_2mm_02bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,2\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm



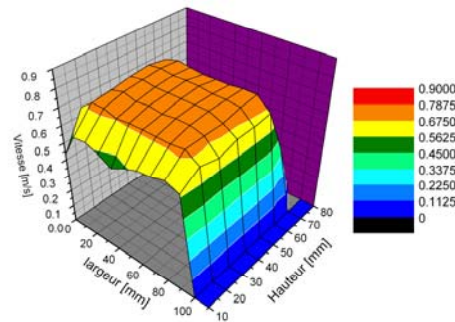
Configuration: 0-4_15mm_2mm_03bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,3\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm



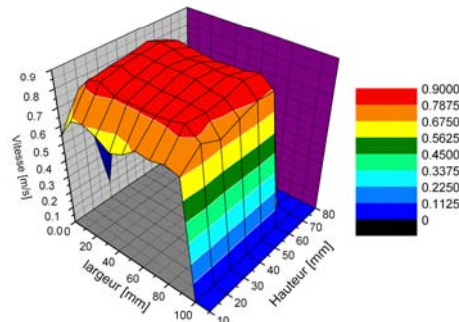
Configuration: 0-4_15mm_2mm_04bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,4\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm



Configuration: 0-4_15mm_2mm_05bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,5\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm



Configuration: 0-4_15mm_2mm_06bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,6\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm

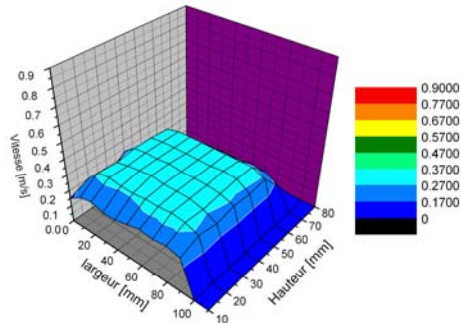


Configuration: 0-4_15mm_2mm_07bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,7\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm

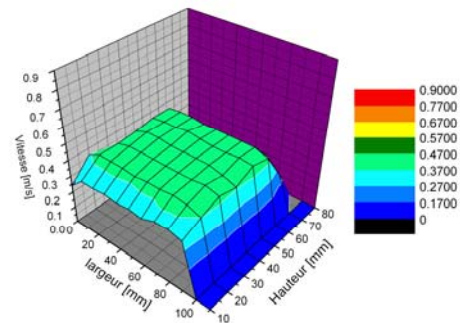
A3. Cartographie de l'homogénéisateur

La configuration **0-4_10mm_3mm** utilise aussi 4 *grilles 43%* avec un espacement de trois mm entre elles. Les trous de la première grille sont obstrués. Entre la première grille (obstruée) et les autres il y a un espace de 10mm.

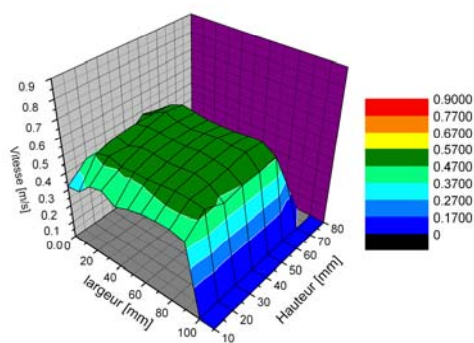
L'espacement entre la première et la deuxième grille est plus petit que précédemment car on a augmenté l'espacement entre les autres grilles tandis que l'épaisseur de l'homogénéisateur est fixe."



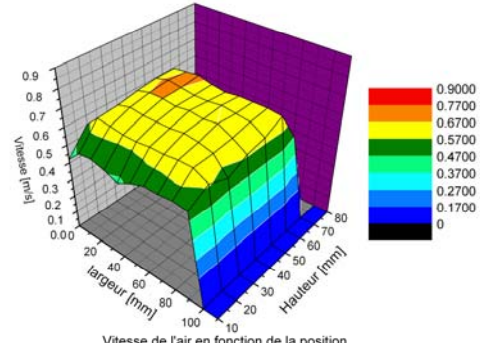
Configuration: 0-4_10mm_3mm_02bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,2\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 10mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 3mm



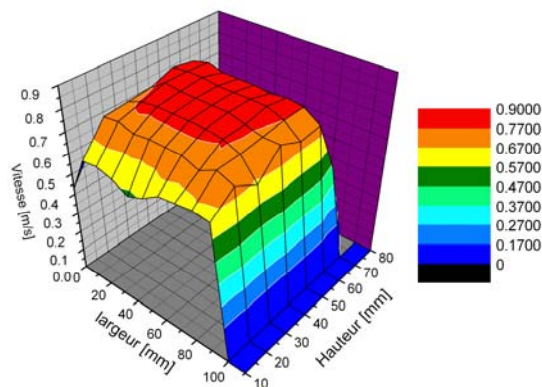
Configuration: 0-4_10mm_3mm_03bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,3\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 10mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 3mm



Configuration: 0-4_10mm_3mm_04bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,4\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 10mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 3mm



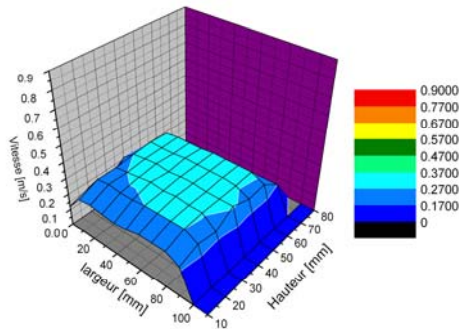
Vitesse de l'air en fonction de la position
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,5\text{bar}$,
avec filtre, mesure à 5mm, distance entre les grilles: 3mm
obstrués les trous dans un diamètre de 45mm
La première grille (obstruée) est à 10mm de la seconde



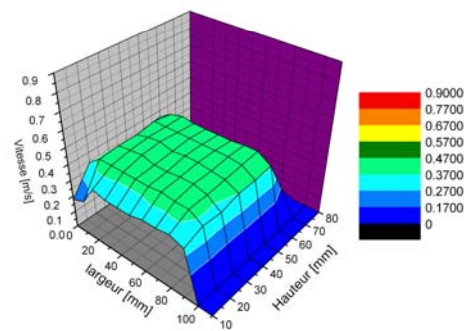
Configuration: 0-4_10mm_3mm_06bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,6\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 10mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 3mm

A3. Cartographie de l'homogénéisateur

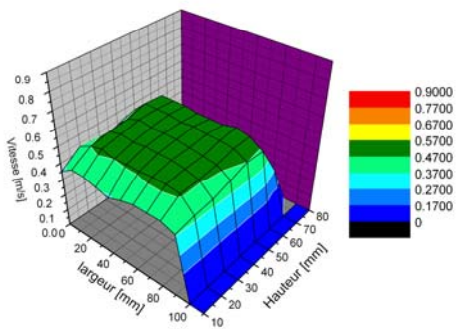
La configuration **0-4_10mm_4mm** utilise aussi 4 *grilles 43%* avec un espacement de quatre mm entre elles. Les trous de la première grille sont obstrués. Entre la première grille (obstruée) et les autres il y a un espace de 10mm.



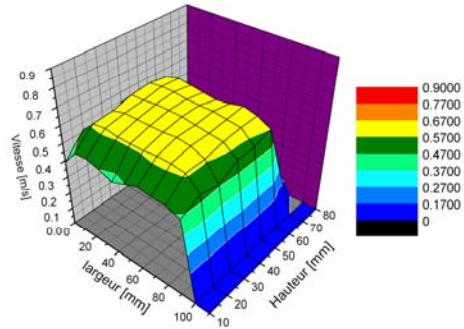
Configuration: 0-4_10mm_4mm_02bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,2\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 10mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 4mm



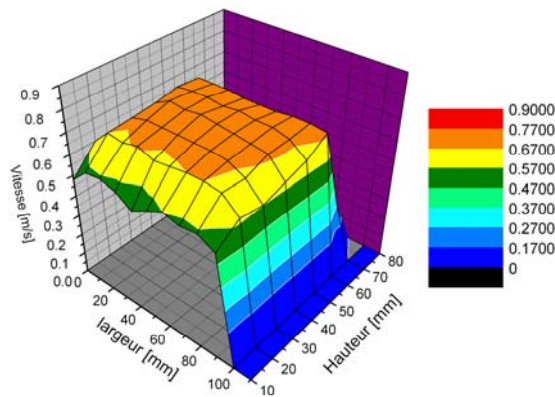
Configuration: 0-4_10mm_4mm_03bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,3\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 10mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 4mm



Configuration: 0-4_10mm_4mm_04bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,4\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 10mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 4mm



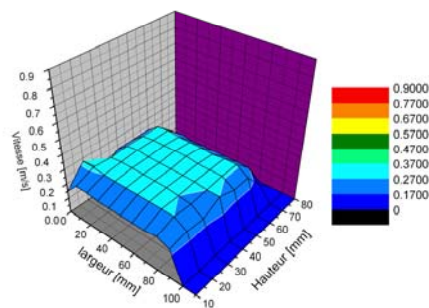
Configuration: 0-4_10mm_4mm_05bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,5\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 10mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 4mm



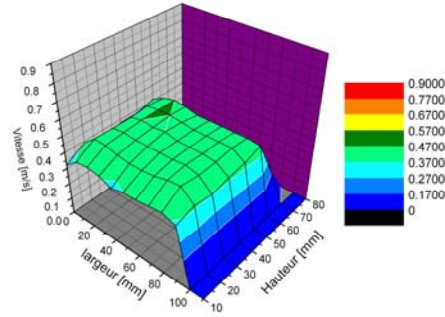
Configuration: 0-4_10mm_4mm_06bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,6\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 45mm.
La première grille est à 10mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 4mm

A3. Cartographie de l'homogénéisateur

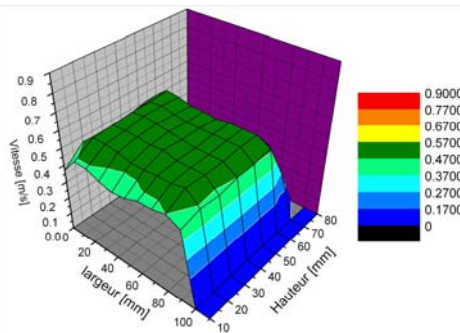
La configuration **0-4_15mm_2mm_obst35** utilise aussi 4 *grilles 43%* avec un espacement de deux mm entre elles. Les trous de la première grille sont obstrués sur un diamètre de 35mm. Entre la première grille (obstruée) et les autres il y a un espace de 15mm.



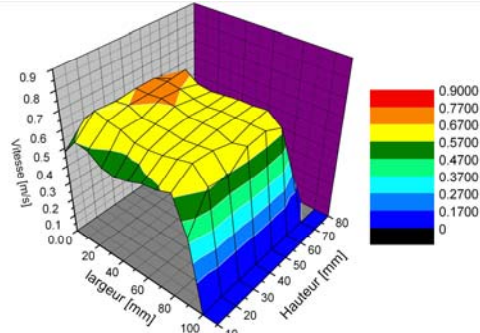
Configuration: 0-4_15mm_2mm_obst35_02bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,2\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 35mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm.



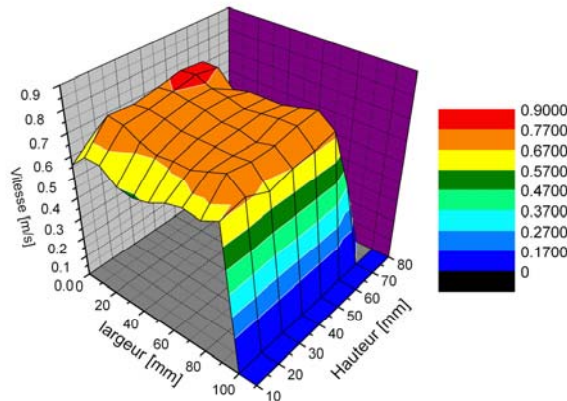
Configuration: 0-4_15mm_2mm_obst35_03bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,3\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 35mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm.



Configuration: 0-4_15mm_2mm_obst35_04bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,4\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 35mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm.



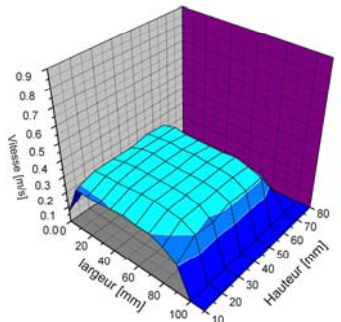
Configuration: 0-4_15mm_2mm_obst35_05bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,5\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 35mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm.



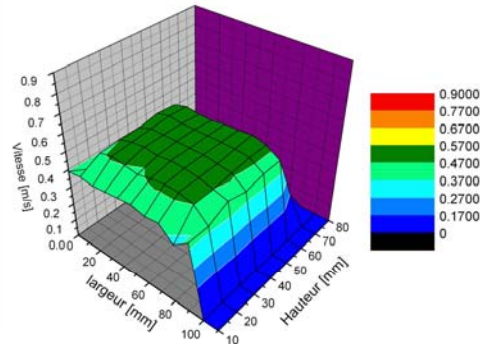
Configuration: 0-4_15mm_2mm_obst35_06bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,6\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 35mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm.

A3. Cartographie de l'homogénéisateur

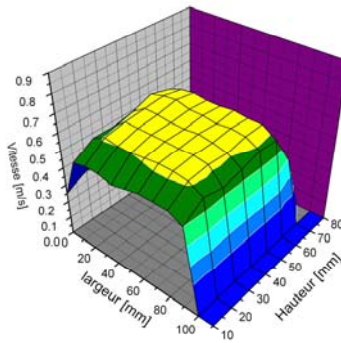
La configuration **0-4_15mm_2mm_obst55** utilise aussi 4 *grilles 43%* avec un espacement de deux mm entre elles. Les trous de la première grille sont obstrués sur un diamètre de 55mm. Entre la première grille (obstruée) et les autres il y a un espace de 15mm.



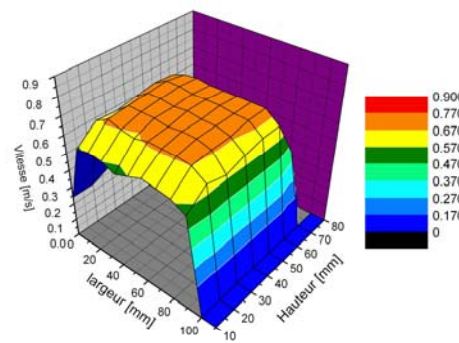
Configuration: 0-4_15mm_2mm_obst55_02bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,2\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 55mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm.



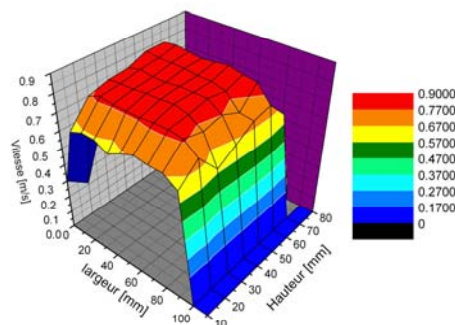
Configuration: 0-4_15mm_2mm_obst55_03bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,3\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 55mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm.



Configuration: 0-4_15mm_2mm_obst55_04bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,4\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 55mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm.



Configuration: 0-4_15mm_2mm_obst55_05bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,5\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 55mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm.

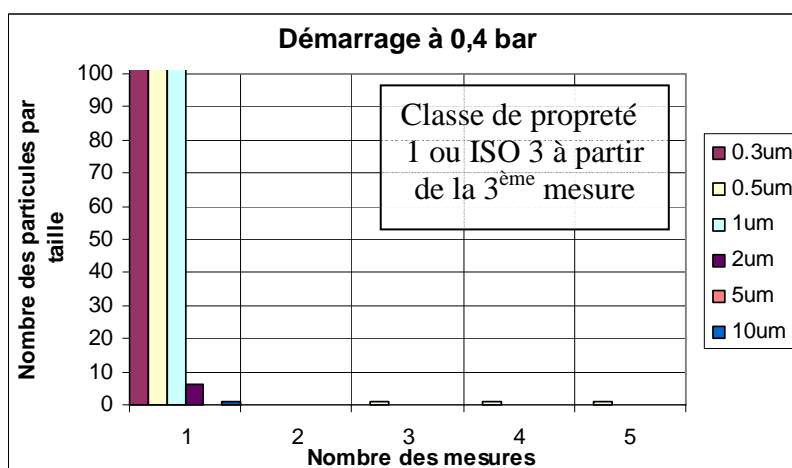
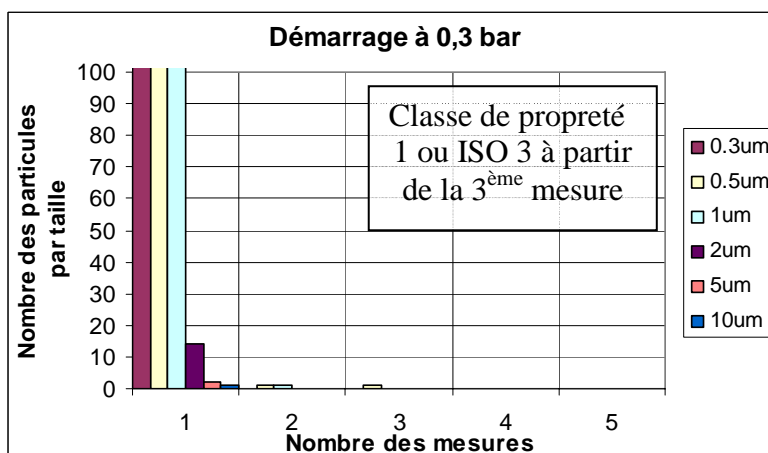
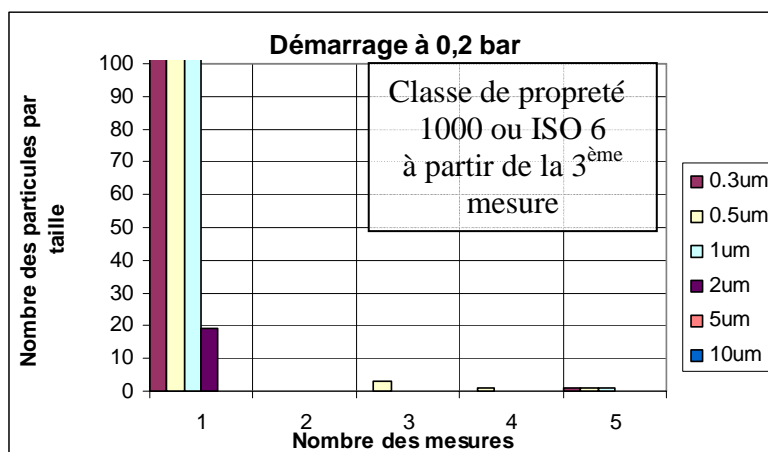


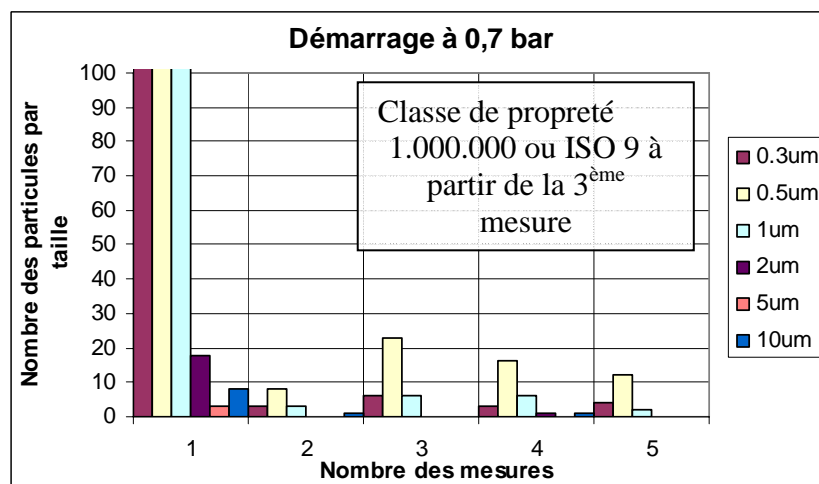
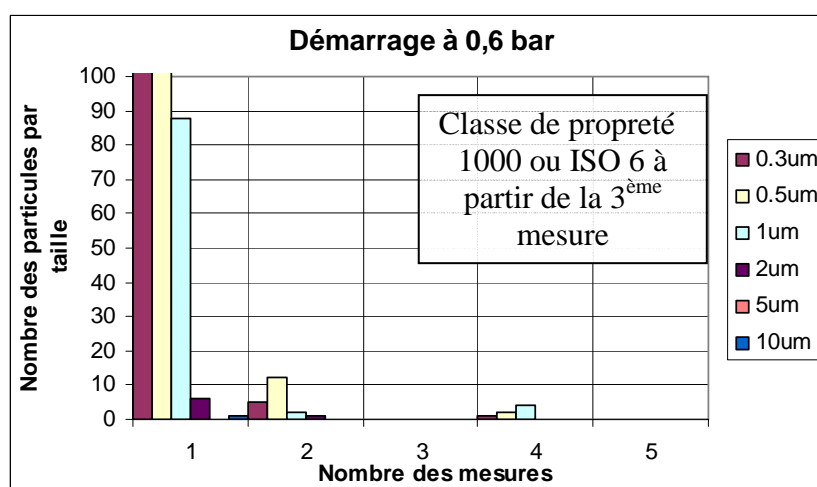
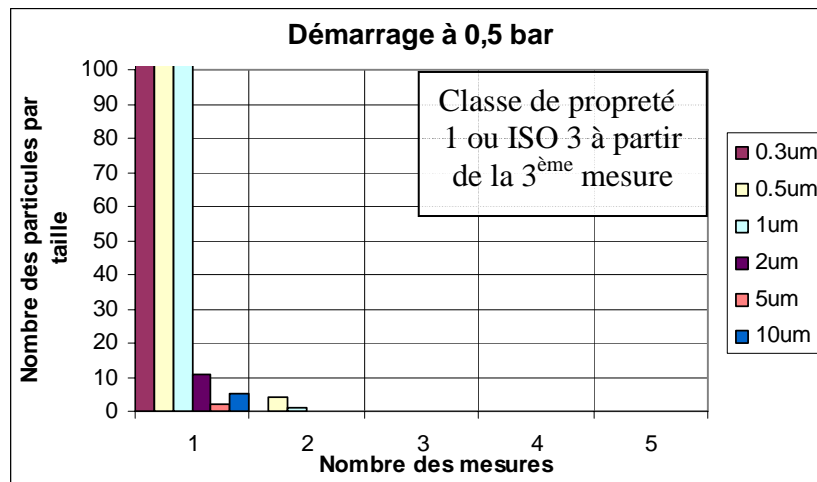
Configuration: 0-4_15mm_2mm_obst55_06bar. Vitesse de l'air en fonction de la position.
0 grilles 64% et 4 grilles 43%, $p=0,6\text{bar}$, avec filtre, mesure à 5mm de la sortie.
Les trous de la 1ère grille sont obstrués dans un diamètre de 55mm.
La première grille est à 15mm de la seconde. Distance entre les autres grilles: 2mm.

A 4. Mesures de la propreté

Les mesures de la propreté sont montrées dans ce paragraphe. Le §4.6 résume ces résultats. Pour chaque situation 6 mesures sont effectuées. Chaque mesure montre le nombre de particules classées par leur taille.

La première série des mesures montre l'évolution de la propreté de la microbox lors du démarrage du flux propre. La première mesure est effectuée avant la mise en marche du flux propre. Chaque mesure dure environ une minute. Durant ces mesures, le robot n'était pas présent. La sonde de mesure a été placée au centre du microbox.



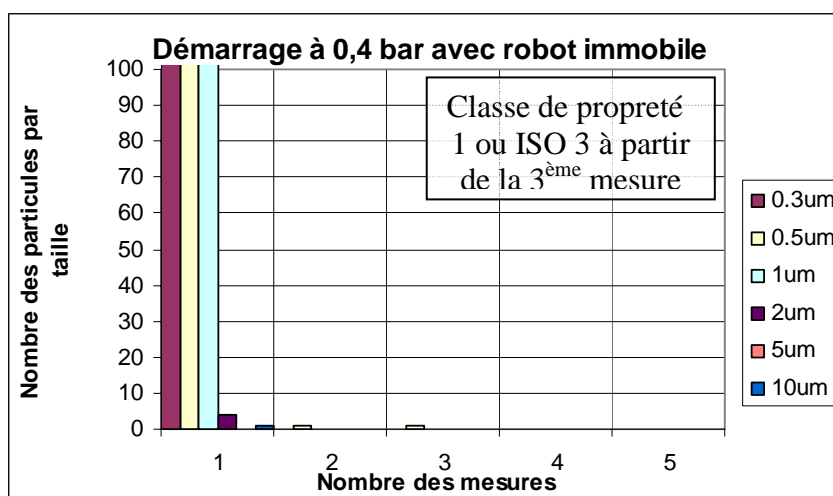
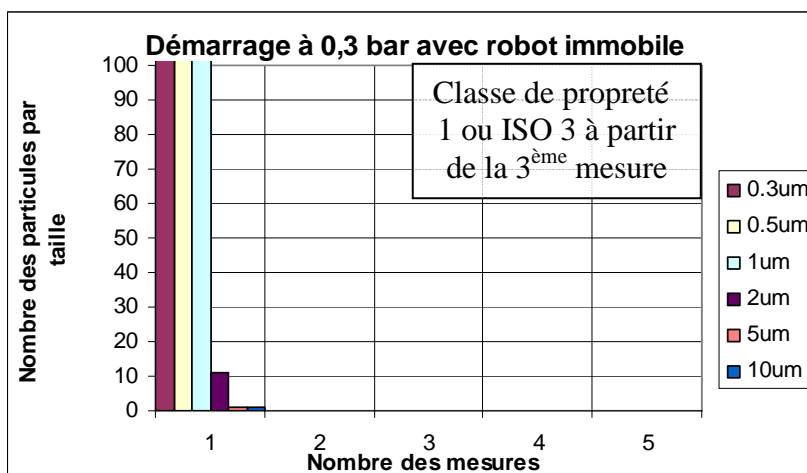
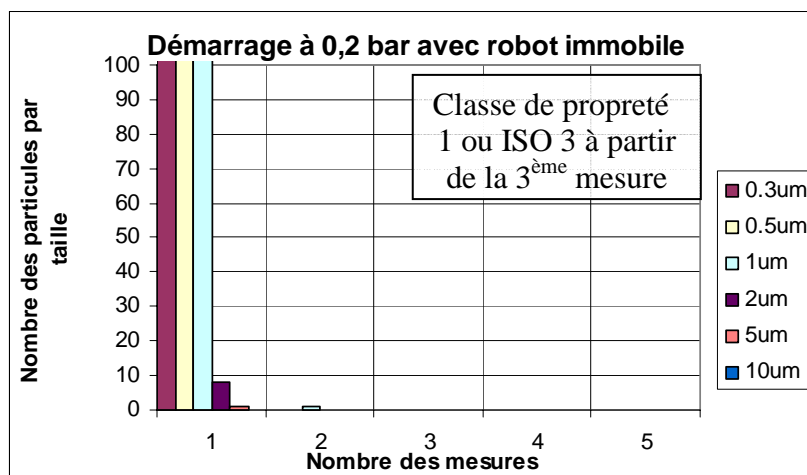


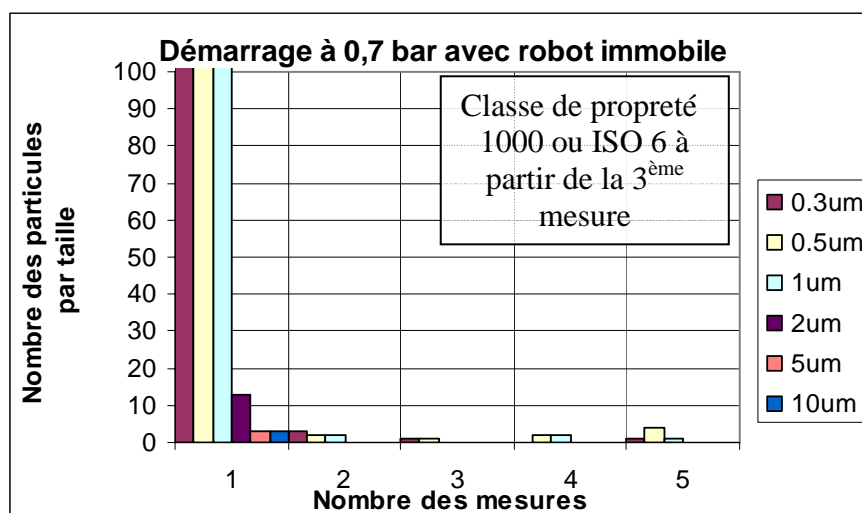
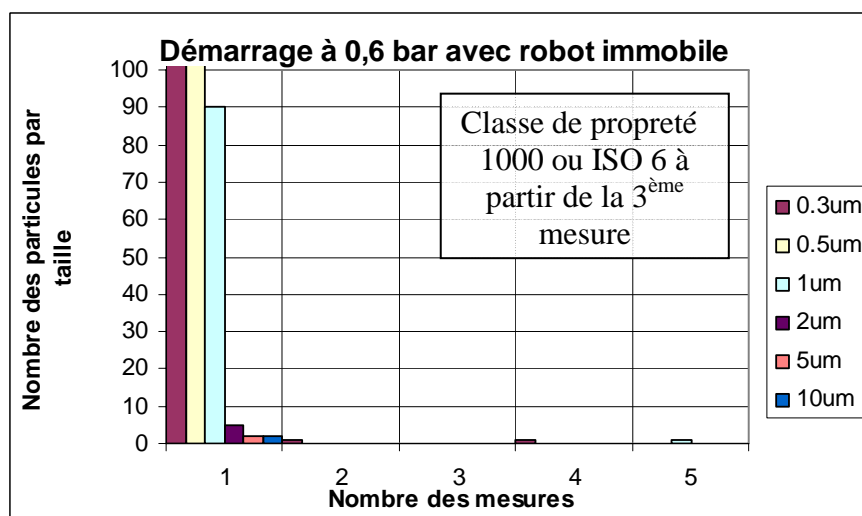
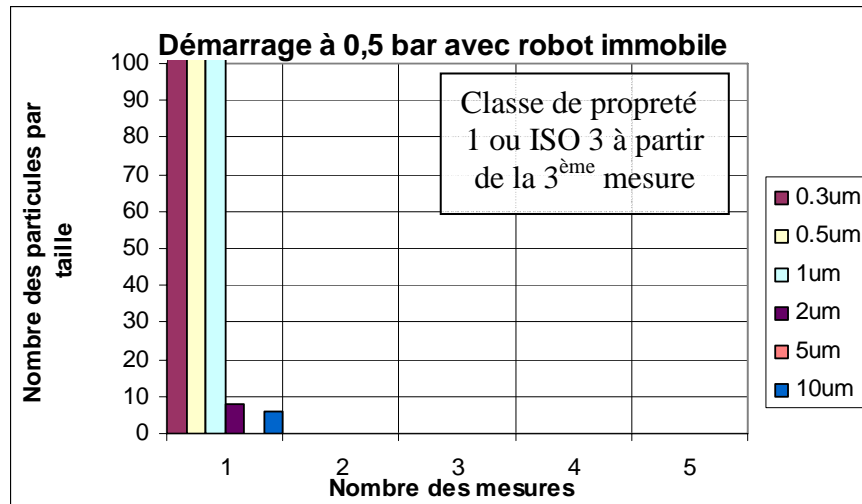
On remarque qu'à part les cas de faible ou de grande pression (0,2 ou 0,7 bar), l'environnement propre est établi en moins de 2 minutes. Les indications sur la classe de propreté pour chaque configuration ne prend en compte que les résultats à partir de la 3^{ème} mesure.

A4. Mesures de la propreté

Lors de cette série des mesures le robot était immobile à la position « *home* », c'est à dire tout près de la sortie de l'homogénéisateur. On constate que sa présence n'influence pas la propreté du microbox. Les résultats sont semblables aux mesures précédentes.

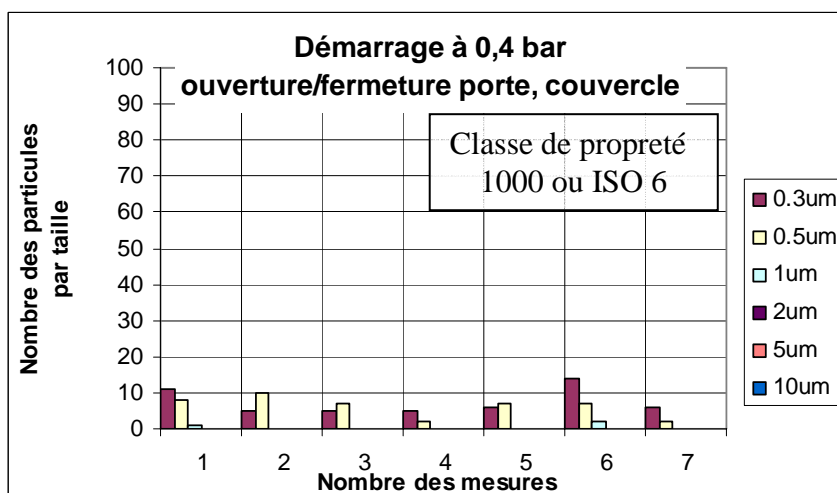
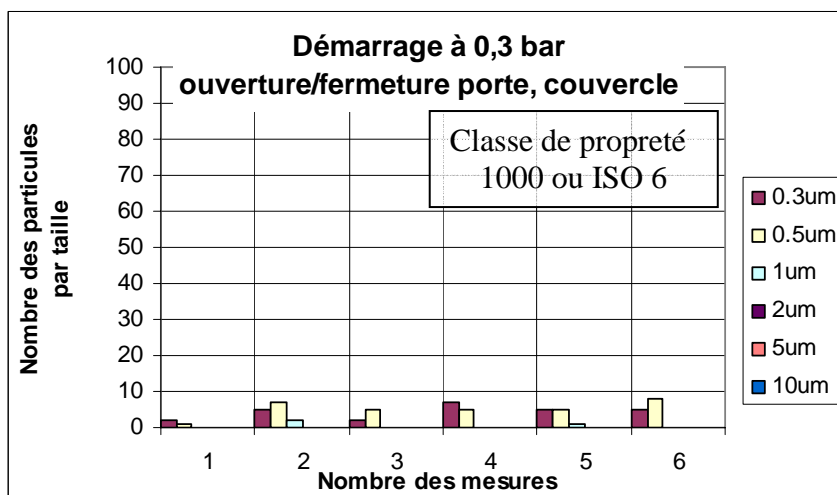
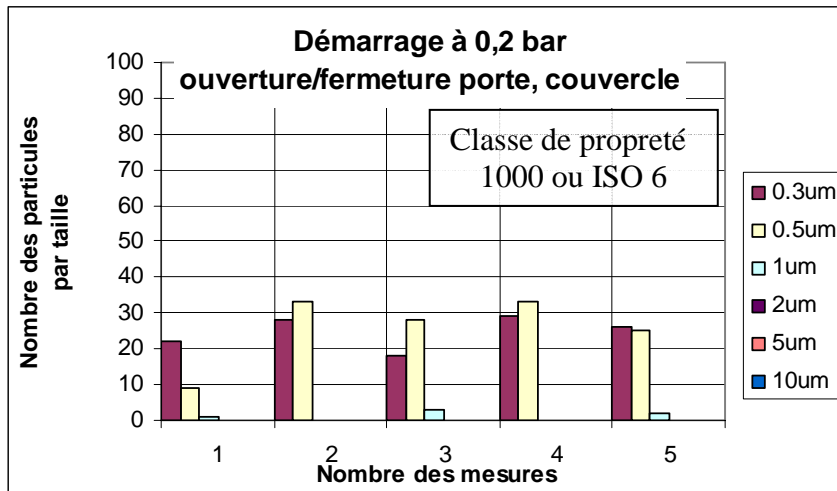
Comme auparavant, la première mesure est effectuée sans la présence du flux d'air propre. Chaque mesure dure 1 minute et on observe à nouveau qu'il faut moins de deux minutes pour établir l'environnement propre. La sonde a été placée à un centimètre du bord du microbox et la face de sortie de l'air était partiellement fermée.

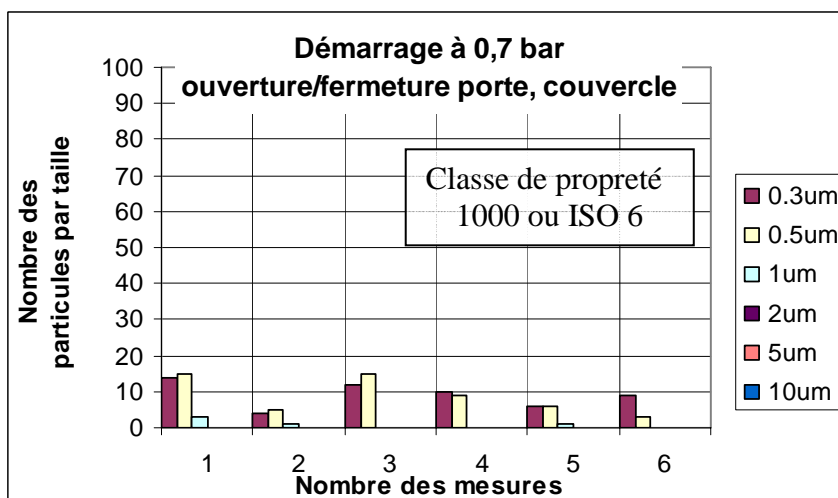
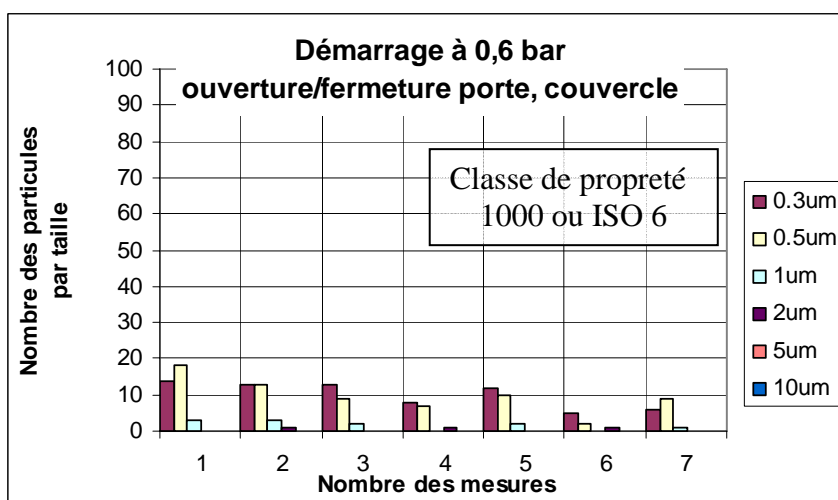
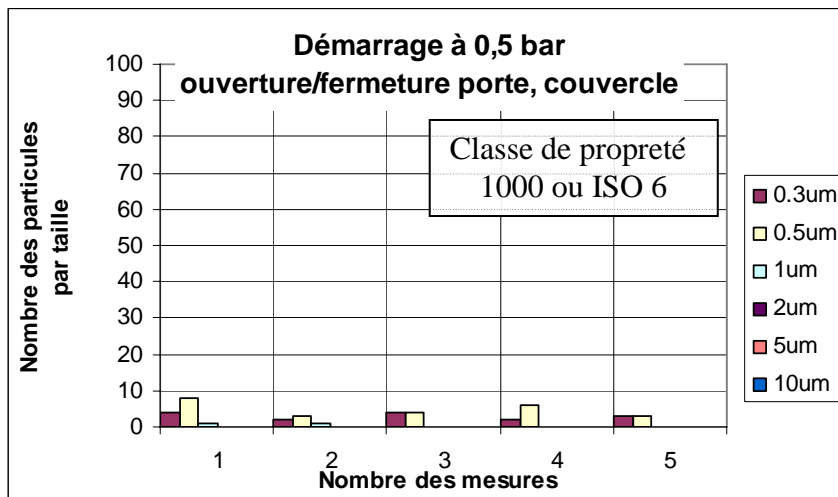




A4. Mesures de la propreté

Durant la série des mesures ci-dessous il y avait l'entrée de la palette dans le microbox. Cette entrée avait les phases suivantes : phase d'approche de la palette à l'entrée du microbox, la phase de lavage de la palette à un flux d'air propre et finalement la phase où le robot ouvre la porte du microbox et dépose le couvercle à la place prévue à cet effet.



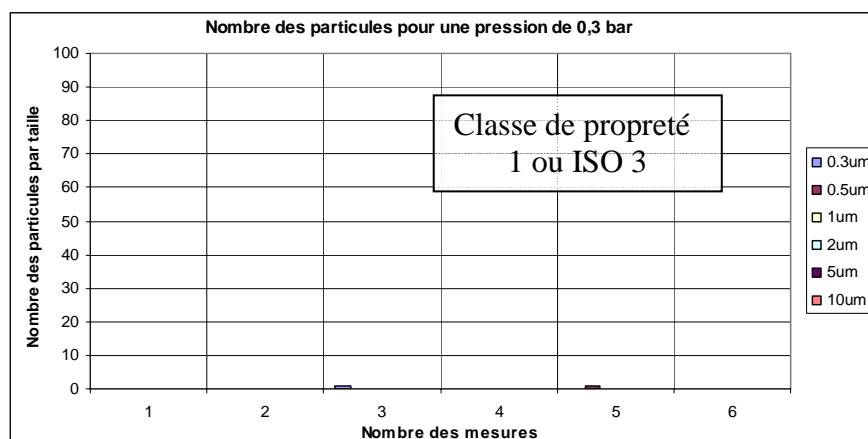
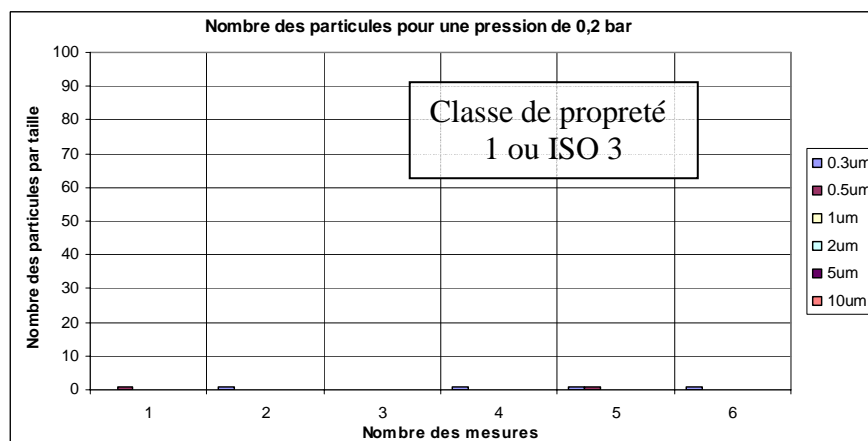
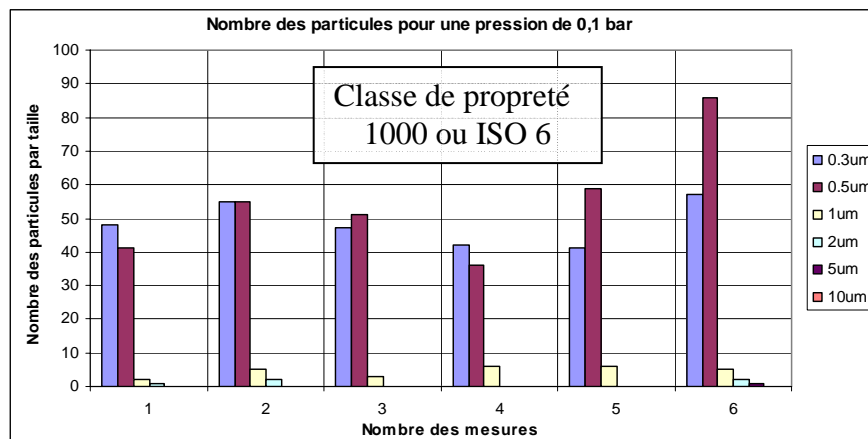


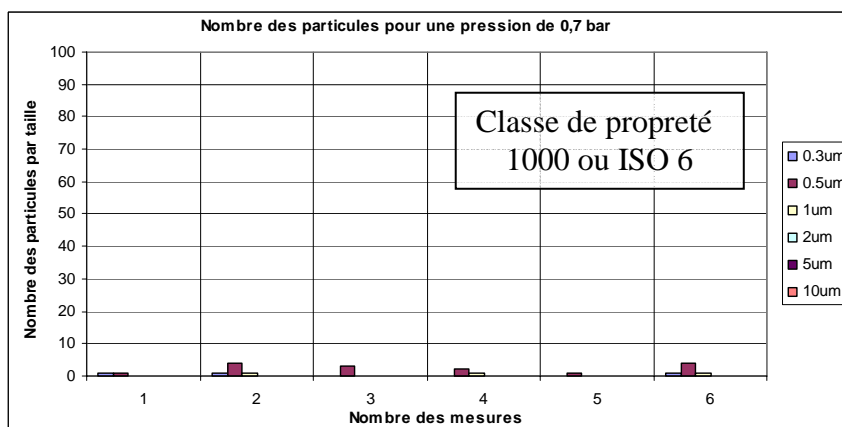
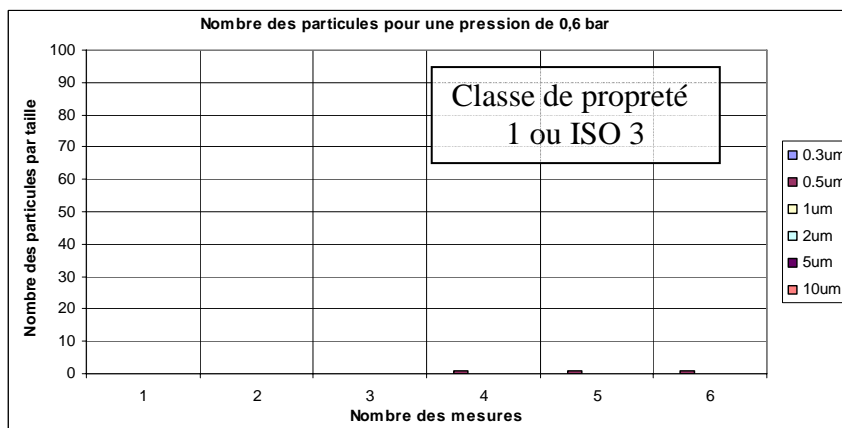
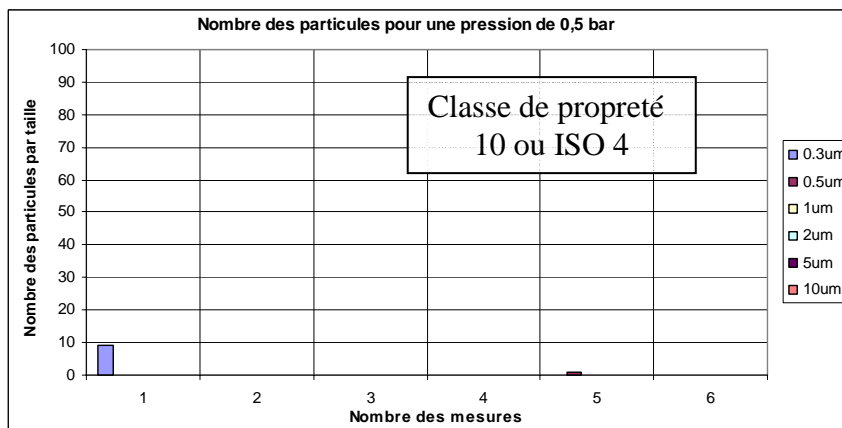
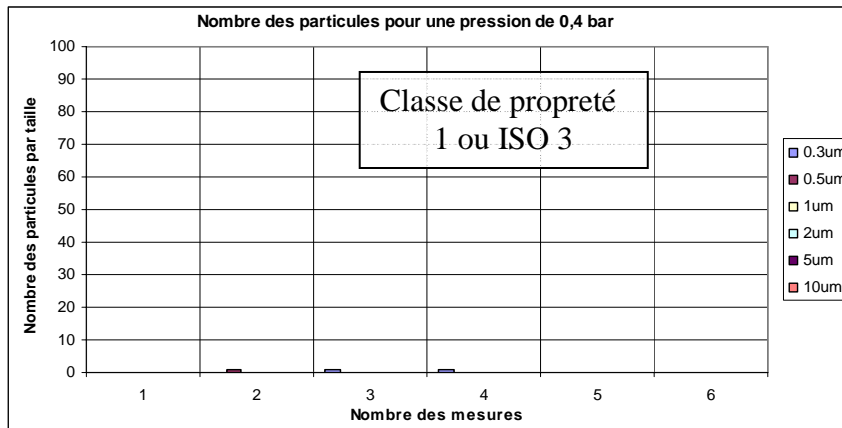
La sonde a été placée à un centimètre du bord du microbox et la face de sortie de l'air était partiellement fermée. L'environnement propre était considéré comme établi. C'est pour cette raison que pour le classement dans la classe de propreté nous avons pris en compte toutes les mesures. La classe de propreté est toujours restée au niveau 1000 car il y avait la présence de particules de $1 \mu\text{m}$.

A4. Mesures de la propreté

La présence sporadique de quelques particules de $1\text{ }\mu\text{m}$, classe la propreté du microbox à la classe 1000, même si une telle particule apparaît que de temps à autre. Pour palier à ce problème nous avons mis en place une méthodologie de «*prélavage*» : au moment du démarrage, pendant une minute la pression d'entrée de l'air est de 1bar. Après nous avons effectué les mesures suivantes.

Nous avons commencé comme précédemment avec des mesures avec le robot arrêté à la position *home*, juste devant l'homogénéisateur. La sonde de mesure a été placée à un centimètre du bord du microbox, dont la face de sortie était partiellement fermée.

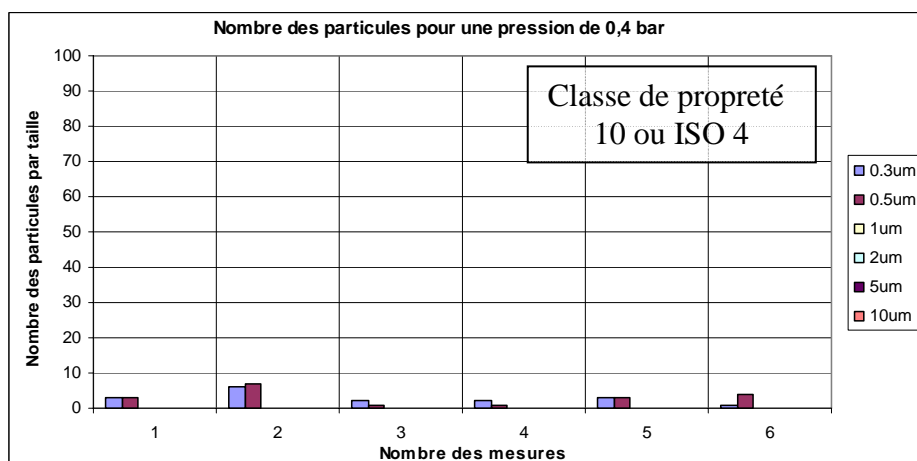
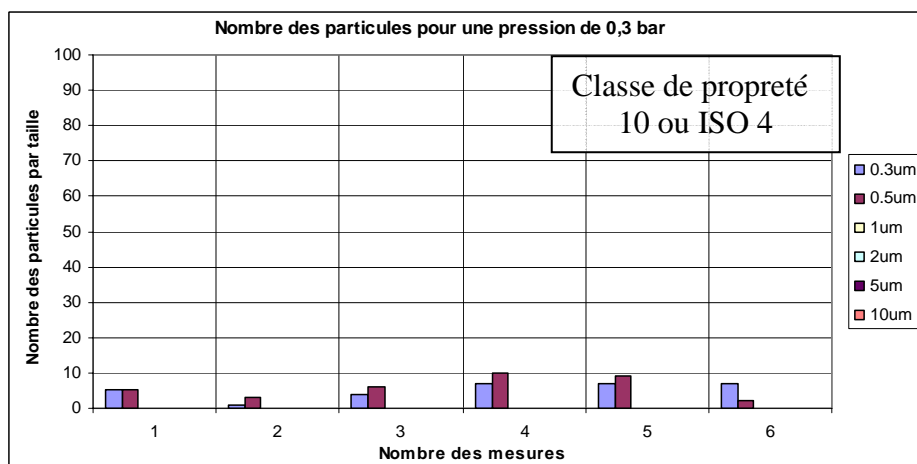
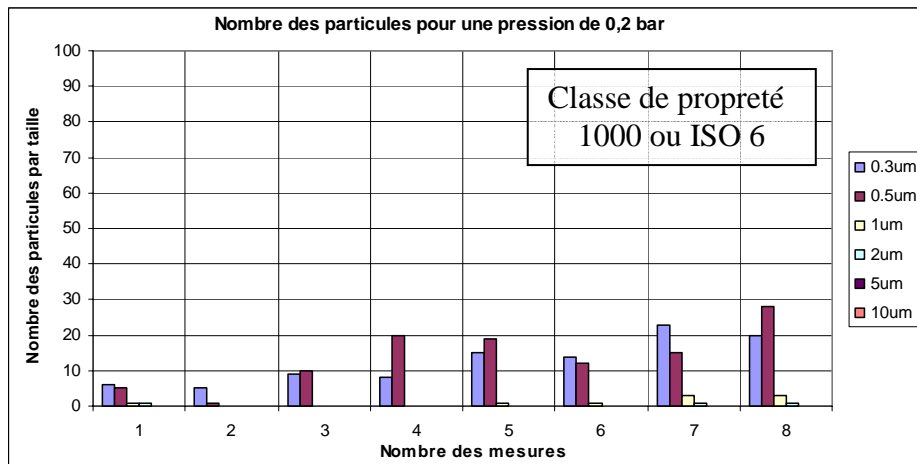




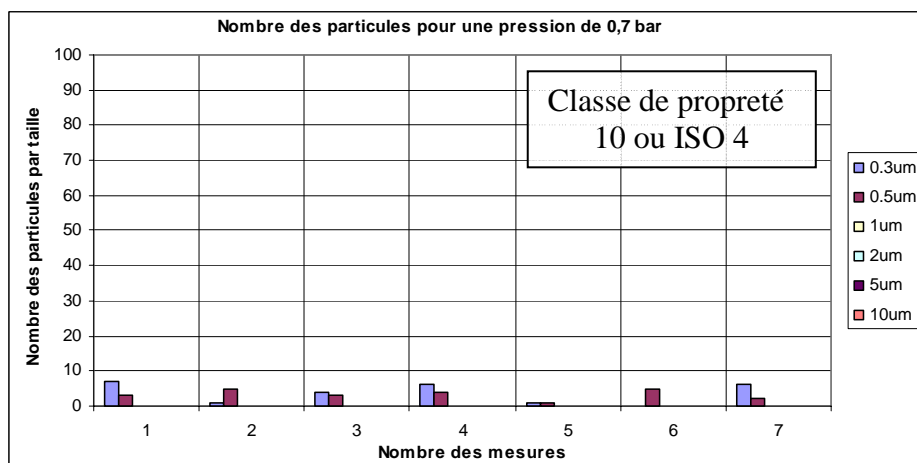
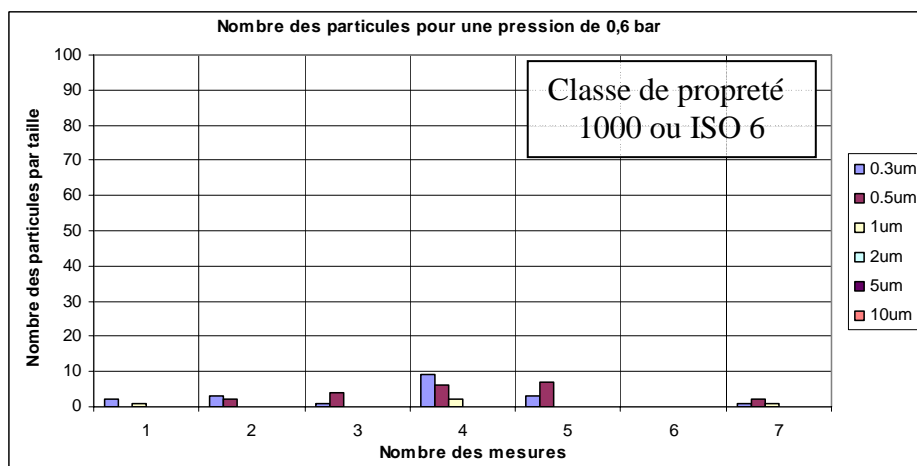
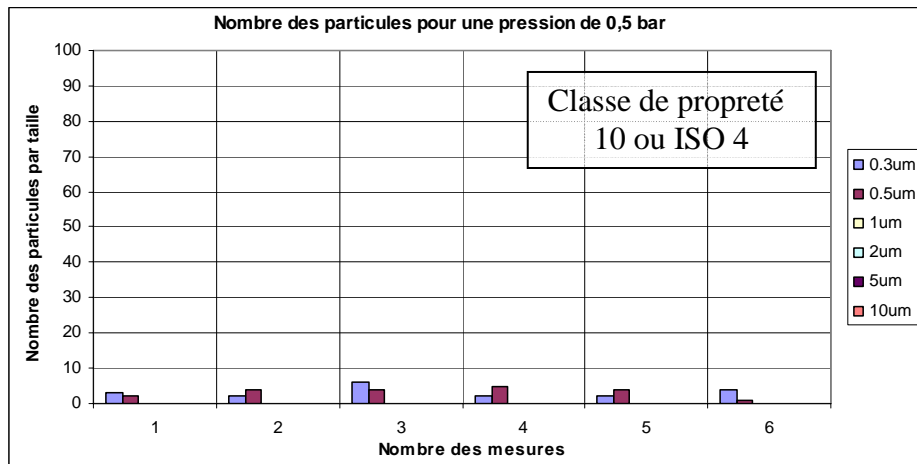
A4. Mesures de la propreté

L'efficacité de cette méthode est visible. Dans les mesures qui suivent, le robot faisait les mêmes opération que dans la série des mesures sans prélavage.

Durant la série de mesures suivante en plus de la phase de prélavage, il y avait l'entrée de la palette dans le microbox. Cette entrée avait les phases suivantes : phase d'approche de la palette à l'entrée du microbox, la phase de lavage de la palette à un flux d'air propre et finalement la phase où le robot ouvre la porte du microbox et dépose le couvercle à la place prévue à cet effet.



A4. Mesures de la propreté



A 5. Quelques concepts de la microfactory

Au paragraphe §5.2 quelques concepts de microfactory ont été décrits. Ici sont présentés certains autres non réalisés à cause de leur grande taille. Pour tous ces concepts le flux de l'air est horizontal. Ce flux étant parallèle aux surfaces des composants empêche le dépôt de microparticules.

Le concept ci-dessous est semblable à celui développé au §5.2.1. Sa taille est bien plus importante que celle du prototype réalisé. Il serait donc possible d'intégrer le filtre dans des modules aussi grands [61].

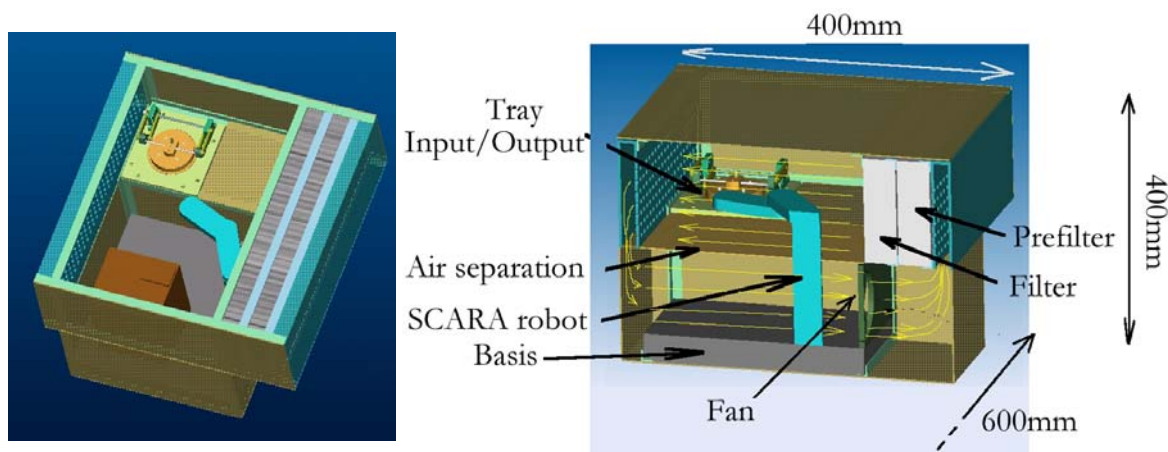


Figure A102 : Concept de grandes microboxes avec récupération d'air.

Un désavantage de ce concept est le fait que le ventilateur génèrera des vibrations gênantes pour les assemblages de haute précision. Aussi, ce concept a besoin d'un système de transfert de palettes entre les microboxes. Le filtre et le système de récupération du flux étant placés latéralement pour laisser la face avant libre pour l'entrée des palettes, ne permettent pas au robot de déposer les sous-ensembles dans les microboxes voisines (Figure A103).

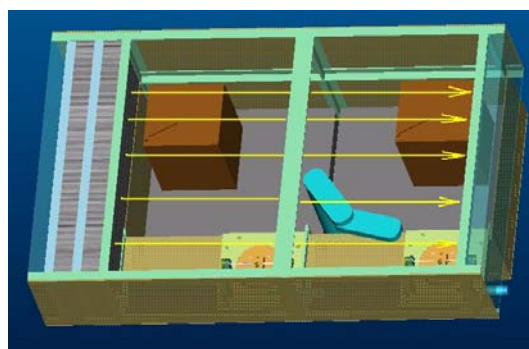


Figure A103 : Concept avec deux microboxes reliées

La Figure A103 montre une alternative du concept précédent en reliant plusieurs microboxes, sans passer par un système de transfert externe. Le grand inconvénient de ce dernier concept est que tous les microboxes doivent avoir le même environnement (pas de possibilité d'avoir un gaz spécial pour l'un d'entre eux, ou avoir une classe de propreté différente). S'il y a génération des particules dans le premier microbox, elles sont entraînées vers les suivants.

Bibliographie

- [1] P. Minotti, P. Lanqulet, P. Le Moal, G. Bourdon, T. Masuzawa. (1998). "*Direct drive electrostatic micromotors using flexible polysilicon rotors*", Journal of intelligent Material systems and Structures 9 (19), pp. 829-836
- [2] http://www.idc-ch2m.com/services/cleanroom/cleanroom_cost.asp, CH2M HILL Industrial Design & Construction Inc. (IDC)
- [3] Matts Ramstorp (2000). "*Introduction to contamination control and cleanroom technology*", Weinheim, Wiley-VCH, ISBN: 3-527-30142-9
- [4] L. Tolliver (1988). "*Handbook of contamination control in microelectronics : Principles, applications and technology*", Park Ridge, New Jersey, U.S.A. : Noyes Publications, ISBN : 0-8155-1151-5
- [5] W. Whyte (1997). "*Les salles propres. Maîtriser la contamination : pourquoi et comment ?*", PYC édition.
- [6] "*Guide de l'ultra propreté 2002-2003*", BCMI Etudes & Conseil, 4ème édition, ISBN : 2-9510114-3-1, p.57
- [7] *Engineering solutions to indoor air quality problems*, 1995. The proceedings of an International Symposium sponsored by the U.S. Environmental Protection Agency and Air & Waste Management.
- [8] R.C. Brown (1993). *Air filtration; an integrated approach to the theory and applications of fibrous filters*, Pergamon Press, ISBN 0-08-041274-2
- [9] Hyung Wook Park, Steven Y. Liang, Wang Lin Liu, Shang-Bin Hsieh (2004). "*On the performance advantages of microscale machine tools*", 4th International Workshop on Microfactories, 15-17 October 2004, Shanghai, China, Vol. 1, p. 92-97
- [10] M. Rakotondrabe, Y. Haddab, Ph. Lutz (2004). "*Modelling and control of a highly modular microassembly system*", 4th international Workshop on Microfactories, 15-17 October 2004, Shanghai, China, Vol. 1, p. 140-145
- [11] K. Fujisaki, Ph. Couty, R. Wüthrich, L.A. Hof, H. Bleuler (2004). "*SACE in microfactory*", Microfactory, 4th international Workshop on Microfactories, 15-17 October 2004, Shanghai, China, Vol. 1, p. 226-231
- [12] Tanaka, M., K. Ashida, K. Kaneko, N. Mishima, H. Maekawa, and T. Tanikawa, (2001). "*Development of Machining Microfactory*", Proceedings of International Conference on Robotics and Automation.
- [13] Y. Okazaki, N. Mishima and K. Ashida, (2002). "*Microfactory and Micro Machine Tools*", 1st Korea-Japan conference on positioning Technology, Daejeon, Korea.
- [14] Makoto Tanaka (2001) "*Development of desktop machining microfactory*". Mechanical Engineering Laboratory Agency of Industrial Science and Technology Ministry of Trade and Industry. Riken Review, No 34, p. 46-49.
- [15] N. Mishima, T. Tanikawa, K. Ashida, H. Maekawa (2002). "*Design of a microfactory*", Proceedings of DETC'02, ASME 2002 Design Engineering technical conferences and computer and information in engineering conference , Montreal, Canada, 29 September - 2 October 2002, Volume 3, p103-110.

- [16] Y. Okazaki, N. Mishima, K. Ashida (2004). “*Microfactory – Concept, History and Developments*”, Journal of manufacturing Science and Engineering, ASME, November 2004, Vol. 126, p. 837-844
- [17] N. Kawahara, T. Suto, T. Hirano, Y. Ishikawa, T. Kitahara, N. Ooyama, T. Ataka (1997). “*Microfactories; New application of micromachine technology to the manufacture of small products*”, Microsystem Technologies, p. 37-41
- [18] N. Mishima (2003). “*Design of a miniature manufacturing system for micro-fabrication*”, Concurrent Engineering: The Vision for the Future Generation in Research and Applications, J. Cha et al. (eds), Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90-5809-622X
- [19] Minifactory project : <http://www.msl.ri.cmu.edu/projects/minifactory/>
- [20] T.B. Lauwers, Z.K. Edmondson, R.L. Hollis (2004). “*Progress in agile assembly: minifactory couriers based on free-roaming planar motors*”, 4th international Workshop on Microfactories, 15-17 October 2004, Shanghai, China, Vol. 1, p. 7-10
- [21] A. E. Quaid and R.L. Hollis (1998), “*3-DOF closed-loop control for planar linear motors*”, in IEEE Int. Conf. on robotics and Automation, (Leuven, Belgium), pp. 2488-2493, May 1998
- [22] Ralph Hollis and Jay Cowdy (1998). “*Miniature factories for precision assembly*”. Proc. Workshop on Micro-Factories, Tsukuba, Japan, December 7-8 1998. Pages 1-6.
- [23] Microfactory prototype : <http://www.olympus.co.jp/en/news/1999b/nr991201mifae.cfm>
- [24] Masayuki Suda, Kazuyoshi Furata, Tochihiro Sakuhara and Tatsuaki Akata, (2000). “*The microfactory system using electrochemical machining*”, Galvanotechnik journal, Japan, vol. 90, No 9, p. 2607-2609.
- [25] H. Dobler, C. Kuhn, J. Neugebauer, B. Klumpp (2001). *Innovative Biochip Production Systems*, Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automations, Stuttgart, Germany
- [26] H. Dobler, C.Kuhm, B.Klumpp, (2000). *Innovative Solutions for biochip production systems*, 2nd international workshop on microfactories, Fribourg switzerland 9-10 October 2000, p. 115-118.
- [27] Gaugel T., Dobler H., Nelson B.J. (2001). “*Advanced Modular Micro-Production System (AMMS)*”, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers -SPIE-, Bellingham/Wash, Microrobotics and Microassembly III : 29-30 October 2001, Newton, USA, SPIE Proceedings Series 4568
- [28] http://www.fraunhofer.de/english/publications/df/df2001/magazine1_2001_t26.html
- [29] Tobias Gaugel, H. Döbler, B.Rohrmoser, J. Klenk, J.Neugebauer, W.Schäfer (2000). “*Advanced modular production concept for miniaturized production*”, 2th international workshop on microfactories, Fribourg switzerland 9-10 October 2000, p. 35-38.
- [30] Alain Codourey, (2002). “*Microfactory: un nouveau concept pour le montage de microsystèmes*”, Informat journal, volume 16, 2002, p.21-25
- [31] Jean-Marc Breguet, Carl Schmitt, Reymond Clavel (2000), “*Micro/Nanofactory: Concept and State of the Art*”, SPIE Vol. 4194, p. 1-12.
- [32] <http://www.brooks.com/products-redirect/FBU/me/>

- [33] Jean-Marc Breguet, Arvid Bergander (2001). *"Toward the Personal Factory?"*, Microrobotics and Microassembly III, Proceedings of SPIE, Vol. 4568, 29-30 October 2001, p. 293-303
- [34] <http://www.ind.tno.nl/mechatronics/ma3/home.htm>
- [35] 12-mm Tape-and-Reel Component Delivery System (1998), Documentation de Texas Instruments.
- [36] Junichi Shiozawa, (2005). *Presentation on research activities, "Desktop Factory, the current promotion status at Sankeyo"*, proceedings of International Forum on Desktop Factory in Suwa (DTF2005), 20 October 2005, Suwa, Japan, p.119-126. www.dtf.ne.jp
- [37] Reijo Tuokko (2005). *"A Finnish View to Micro and Desktop Factories – Experiences and Future Plans"*, DTF 2005, International Forum on Desktop Factory in SUWA, Japan, 20 October 2005
- [38] Kvestoslav R. Spurny (1998). *"Advances in aerosol filtration"*, Lewis Publishers, ISBN 0-87371-830-5
- [39] Jean Figour (1988). *"Vue d'ensemble de l'assemblage automatisé"*, Journées de la microtechnique 1988, p.39-56
- [40] Alain Bourjault (1988). *"Conceptualiser l'assemblage"*, Journées de la microtechnique 1988, p 59-74
- [41] We-Min Chow (1990). *"Assembly Line Design: methodology and applications"*, Ed. Marcel Dekker, ISBN: 0-8247-8322-0
- [42] A. Koelemeijer-Chollet, 2001. *Méthodologie pour la conception de microsystèmes et de leur équipement d'assemblage*. Thèse EPFL No 2343 (2001).
- [43] Hütte (1960) - *Manuel de l'ingénieur : I. Bases théoriques et technologiques*, Paris et Liège, Librairie polytechnique Ch. Béranger
- [44] HEPA Corporation, 2002, Application Guidelines.
- [45] Tengfang Xu (2004). *"Considerations for Efficient Airflow Design in Cleanrooms"*, Journal of the IEST, vol. 47, p. 24-28.
- [46] I.E. Idel'cik, traduit du russe par M. Meury, 1999, *Memento des pertes de charge : Coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement*, Paris, Editions Eyrolles
- [47] *Encyclopédie des Gaz*, (1976). L'air Liquide, division scientifique, Editions. Elsevier, ISBN 0-444-41492-4
- [48] Carl Yaws, 2001, *Matheson Gas Data Book*, Parsippany, NJ 07054, ISBN 0-07-135854-4
- [49] A. Reust, 2006. *Conception, modélisation et caractérisation de la cinématique des interfaces flexibles*. Travail pratique de master, LSRO, EPFL
- [50] Ahmed Berrada (2004). *Microrobot de 4DDL pour manipulation dans un module de la "PocketFactory"*, Projet de semestre, LRO2, EPFL
- [51] Yves Girardin (2003). *"Conception d'un robot à 4 DDL de petite taille"*, Projet de semestre d'hiver, LSRO2, EPFL
- [52] Sébastien Perroud (2005). *"Mise en service d'un mini robot Delta"*, Travail de diplôme, Ecole d'ingénieurs de Bienne,

http://www.hti.bfh.ch/fileadmin/img/HTI/Diplomarbeiten05/bfh04-05_Mi_Perroud.pdf

- [53] Elsbeth Heinzelmann (2005). *“Die Hightech-Fabrik im Tachenformat“*, Swiss Engineering, vol. 12.
- [54] Reymond Clavel (1991). *Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté*. Thèse EPFL, no 925 (1991).
- [55] Alain Codourey (1991). *Contribution à la commande des robots rapides et précis : application au robot delta à entraînement direct*. Thèse EPFL No 922 (1991).
- [56] *"System for transferring Substrates into Clean rooms"*, United States Patent, Pat. No: US 5.628.683, 13/5/97
- [57] *"Ergonomic, variable size, bottom opening system compatible with a vertical interface"*, United States Patent, Pat. No: US 6.220.808B1, 24/4/2001
- [58] Yves Girardin (2005). *Système d'introduction des palettes propres dans la "PocketFactory"*, Travail pratique de master, LSRO2, EPFL
- [59] M. Honegger 2002. *« A java-Based Framework for the design of robot Controllers »*. Proceedings of MSy '02, Winterthur Switzerland, October 2002.
- [60] Jérôme Werlen (2005). *“Démonstrateur de la "Pocket Factory”*“, Travail de semestre d'été, LSRO2, EPFL
- [61] Mélanie Dafflon (2002). *“Microfactory”*, Travail de diplôme, LSRO2, EPFL

Curriculum Vitae

Irène Verettas
Née le 24 Octobre 1974
Nationalité Grecque et Allemande
Célibataire

Formation

- 2003-2006 : Thèse de doctorat
1995-2001 : Diplôme d'ingénieure en Microtechnique, EPFL
Orientation : Techniques de Production.
1994-1995 : Cours Mathématiques Spéciales (CMS-EPFL).
1989-1992 : Baccalauréat scientifique en Grèce, mention *Très Bien*.

Expérience professionnelle

- 2001-2003 : Projet Industriel (CTI) entre Leica Geosystems et le LSRO-EPFL. Projet sur le positionnement submicronique des petits éléments optiques.

Publications

- *"Microfactory: desktop cleanrooms for the production of microsystems"*, I. Verettas, R. Clavel, A. Codourey, ISATP2003, Besançon, France.
- *"A surface-mounted device assembly technique for small optics based on laser reflow soldering"*, L. Stauffer, A. Würsch, B. Gächter, K. Siercks, I. Verettas, S. Rossopoulos, R. Clavel, Optics and Lasers in Engineering, V.43, P. 365-372, 2005.
- *Micro Factory: Concept d'une chaîne d'assemblage miniature, modulaire et propre*, Verettas, I; Clavel, R; Codourey, A – Présenté à la *Journée d'étude de la Société Suisse de la Chronométrie*, Bienne, Suisse, 29 Septembre 2005
- *"Pocket Factory": Concept of miniaturized modular cleanrooms*, Verettas, I; Clavel, R; Codourey, A – Presented at *1st Topical Meeting on Microfactories "Desktop MEMS and Nano Factories" TMMF2005*, Tsukuba, Japan, 17-19 October 2005, p. 71.

Brevets

- S. Rossopoulos, I. Verettas, R. Clavel, **"Process for soldering miniaturized components to a base plate"**, Leica Geosystems, 2004. Pat. No.: WO2004/050287 A1
- A. Wuersch, S. Rossopoulos, I. Verettas, R. Clavel, **"Method for fixing a miniaturized component to a carrier plate"**. Leica Geosystems, 2004. Pat. No.: WO 2004/052070 A1

Langues

- Bilingue Grec et Français (Grec, langue maternelle).
Anglais : Très bonnes connaissances, Allemand : Bonnes connaissances.

Divers

- Samaritaine: Membre du group de premiers secours de l'EPFL. Brevet de Sanitaire d'entreprise.
- Théâtre: Membre de la troupe de théâtre de l'EPFL : Les Polyssons. Présidente en 2003 et 2004.

